

郭晴宜,李贺,施式亮,等. 高压气液两相射流冲击破煤特性[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(1):11-17. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.002

GUO Q Y, LI H, SHI S L, et al. On the Characteristics of Coal Breaking by High Pressure Gas-Liquid Two-Phase Jet Impact [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(1):11-17. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.01.002

高压气液两相射流冲击破煤特性

郭晴宜,李贺*,施式亮,鲁义,路洁心,王正,徐超平

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:目前,水力割缝技术已经成为治理煤矿瓦斯灾害,实现煤层卸压增透的主要手段之一.高压气液两相射流作为一种新型高效的多介质强力射流,在冲蚀破岩性能上优于传统单介质射流.为了提高高压气液两相射流的破煤性能和卸压增透效果,通过改变高压气液两相射流的含气率、射流压力、冲击靶距以及喷嘴直径等基本参数,并结合超声波系统,探究了关键参数对两相射流冲击破煤的影响.结果表明:高压气液两相射流的冲击侵蚀破煤比传统纯水射流效果更显著,并且当含气率 $F_a = 30%$,射流压力 $P_w = 10$ MPa,冲击靶距 $D_s = 300$ mm,喷嘴直径 $D_n = 3.5$ mm 时,气液两相射流冲击破煤的效果更好.试验研究结果对于含气率、射流压力、冲击靶距及喷嘴直径等关键参数的选择提供了合理的参考,有效地提高了高压气液两相射流冲击破煤的效果.

关键词: 高压气液两相射流;破煤特性;含气率;射流压力;冲击靶距,喷嘴直径

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2024)01-0011-07

On the Characteristics of Coal Breaking by High Pressure Gas-Liquid Two-Phase Jet Impact

GUO Qingyi, LI He, SHI Shiliang, LU Yi, LU Jiexin, WANG Zheng, XU Chaoping

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: At present, hydraulic cutting technology has become one of the main means to control coal mine gas disaster and realize the pressure discharge of coal seam. As a new type of highly efficient multi-medium powerful jet, the high-pressure gas-liquid two-phase jet is better than the traditional single-medium jet. In order to improve the coal breaking performance and pressure increasing effect, the basic parameters, such as the gas content, jet pressure, impact target distance and the nozzle diameter on the impact of the two-phase jet are combined with the ultrasonic system. Results show that the impact erosion of high-pressure gas-liquid jet is more significant than the traditional pure water jet. When the gas content $F_a = 30%$, the jet pressure $P_w = 10$ MPa, the impact target distance $D_s = 300$ mm and the nozzle diameter $D_n = 3.5$ mm, the gas-liquid two-phase jet is better. The test results provide a reasonable reference for the selection of key parameters, such as gas content, jet pressure, impact target distance and nozzle diameter, and effectively improve the effect of high-pressure gas-liquid two-phase jet impact on coal breaking.

Keywords: high pressure gas-liquid two-phase jet; coal breaking characteristics; gas content; jet pressure; standoff distance; jet diameter

收稿日期:2022-04-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904103;51974120)

*通信作者, E-mail:281323093@qq.com

由于我国高瓦斯煤层多为低渗透率煤层,因此增强煤层渗透率成了瓦斯抽采的关键措施,其中,水力割缝增透技术在煤矿采掘中广泛应用^[1-2].气液两相射流作为一种新型多介质高效射流,由美国伊利诺斯州大学 D.L.Eddingfield 和 M.Albrecht 最早提出,这是一种将高压气相与液相在管道中混合,然后从喷嘴喷出气液两相射流,对目标煤岩体进行冲击的技术.近年来国内学者对气液两相射流的研究呈上升趋势^[3-5].杨永印等^[6]利用数值模拟并结合试验研究对气体保护射流进行了较为系统的研究,研究表明:淹没条件下保护气体可以减少射流摩擦阻力,降低能量损失,大幅度提高射流的有效靶距;胡东等^[7]利用自吸渗气原理提出自振脉冲气液射流,通过冲蚀实验发现,射流含气率及腔长影响气液射流振荡频率及冲蚀效果;中国矿业大学林伯泉^[8-9]基于现有水力割缝技术,设计研发了高压气液两相射流割缝破岩系统,并对其破岩性能进行相关研究,结果发现:与纯水射流相比,高压气液两相射流的破煤岩压力门限降低,破煤岩效率大大提高.

由此可知,在高压气液两相射流冲击破煤的研究中,众多学者对气液两相射流的结构特征及冲蚀破岩性的研究比较深入,但对于影响气液两相射流破煤性能的主要因素鲜有报道.因此通过改变两相射流的基本参数,并结合超声波系统,探究了含气率、射流压力、冲击靶距、喷嘴直径这4个关键参数对两相射流冲击破煤的影响,为提高高压气液两相射流的破煤性能和卸压增透效果提供了合理的参考.

1 试验准备

1.1 试样制备

由于煤层岩层结构复杂,且难以规则取块,试验效果不佳,所以采用型煤试样作为相似块.试样以河南古汉山矿原煤为参考对象,采用一定配比(细砂:水泥=3.37:1.00)制成,尺寸大小为300 mm×300 mm×300 mm,单轴抗压强度为20 MPa,试样制备所需材料、模具及试样实物图如图1所示.

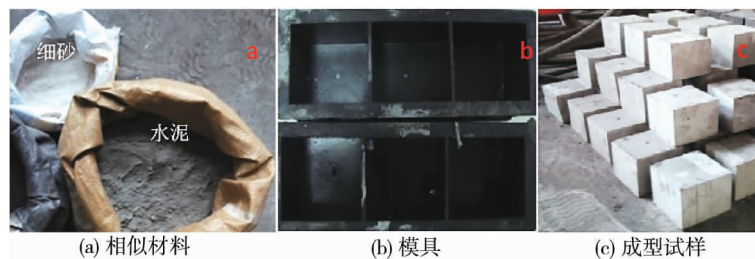


图1 试验制备材料、模具及试样实物

1.2 试验装置

本试验采用高压气液两相射流冲击钻孔实验系统(如图2所示),包括高压供水系统、高压供气系统、气液混合器、喷射系统、超声波分析系统等.

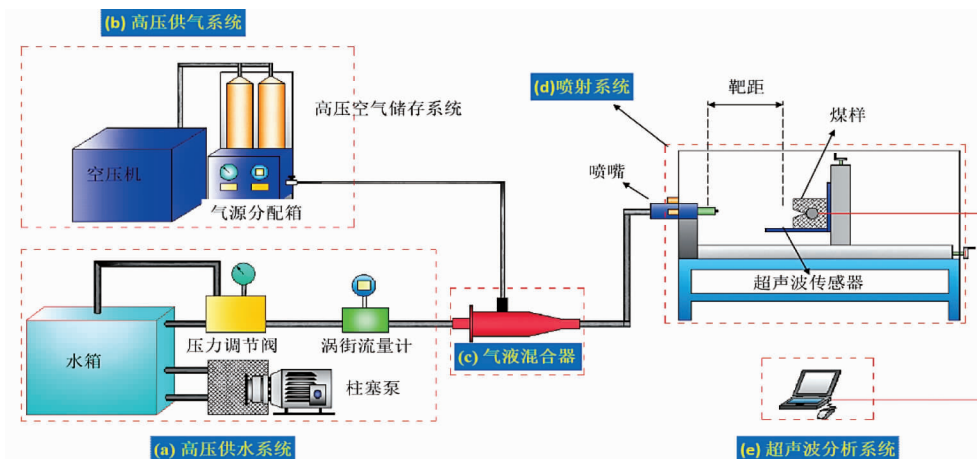


图2 试验系统装置

1.3 试验方案

试验通过分别改变含气率(F_a)、射流水压(P_w)、冲击靶距(D_s)和喷嘴直径(D_n)来研究破煤特性.以冲击侵蚀试样的孔深、孔径和孔容量作为响应特征,分析其在不同参数下的破煤特性.其中,孔深为从样品表面到钻孔最深处的距离^[10].孔最窄部分的直径决定了喷头是否可以通过钻孔,所以孔径测量在钻孔最窄的地方^[11-13].钻孔完成后,使煤样充分干燥后采用换砂法测量孔体积.在相同的试验条件下,每组试验重复 3~4 次,并取其平均值作为试验结果,具体试验方案及数据设置见表 1.

表 1 高压气液两相射流破煤试验方案

组别	含气率 F_a /%	射流压力 P_w /MPa	冲击靶距 D_s /mm	喷嘴直径 D_n /mm	冲击时间 t /s
第一组	0~50(间隔=5)	10	300	3.0	120
第二组	0,30	0~20(间隔=2)	300	3.0	120
第三组	0,30	10	100~500(间隔=50)	3.0	120
第四组	0,30	10	300	1.5~5.0(间隔=0.5)	120

为研究冲击侵蚀过程中冲击孔洞周围试样内部损伤,布置超声测点来分析高压气液两相水射流下冲击试样破碎过程中的破裂分布,测量了冲击侵蚀过程中试样随时间的超声波纵向速度分析试样的物理损伤,超声波试样测点和超声波如图 3 所示.

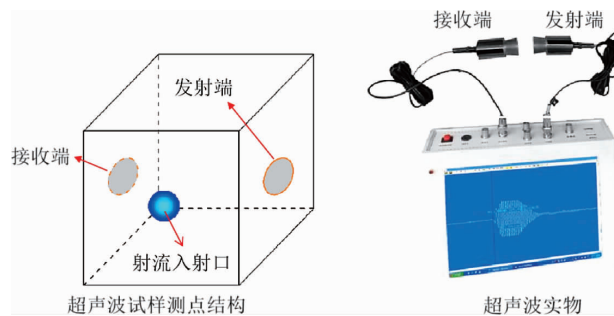


图 3 超声波试样测点结构示意图和实物

2 研究结果与分析

2.1 不同含气率对高压射流破煤特性的影响

含气率是影响射流压力和发散度的重要因素之一,为分析含气率对高压气液两相射流冲击试样钻孔的影响,分别将射流压力 P_w 、冲击靶距 D_s 、喷嘴直径 D_n 和冲击时间 t 设为 $P_w = 10$ MPa、 $D_s = 300$ mm、 $D_n = 3$ mm 和 $t = 120$ s 并保持不变,对不同含气率下的高压气液两相射流进行试样冲击试验,并对同一含气率进行 3~4 次冲击试验,试验完成后按 1.3 节的试验方案测量冲击试样的孔深、孔径和孔容量,分别取其结果的最大值、最小值和平均值绘制曲线图,如图 4 所示.

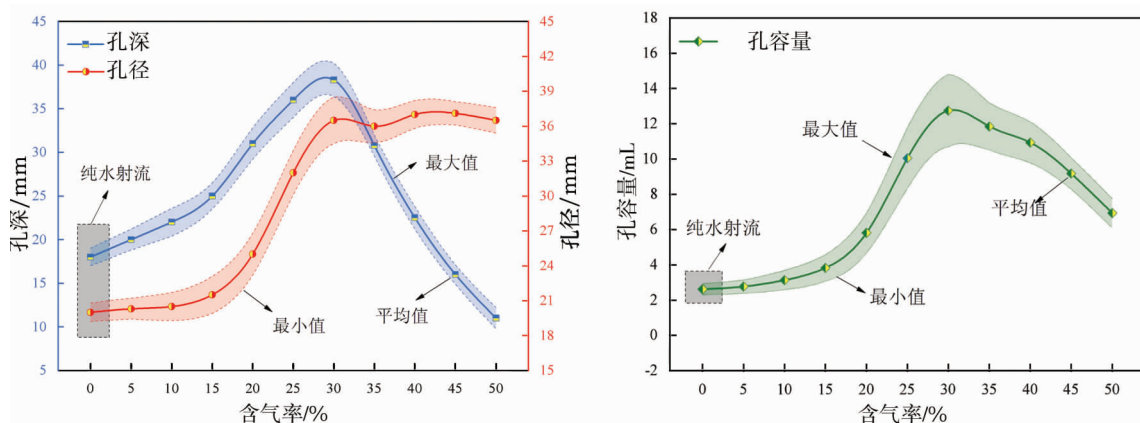


图 4 试样孔径、孔深和孔容量随射流含气率变化的曲线

由图4可知:高压气液两相射流冲击试样时,冲蚀试样会形成大小不同的孔深和孔径.孔深随着含气率的升高呈现先逐步升高后降低的趋势,在含气率为30%左右时,孔深达到峰值(38.5 mm);孔径随着含气率的升高呈现先增大后保持平稳的趋势,同样在含气率为30%左右达到峰值(35.8 mm).同时,孔容量的趋势和孔深趋势相一致,也是含气率在30%左右达到孔容量峰值(12.5 mL).由此可见,适当增加高压空气量混入可以改善水力割缝增透技术,并且最佳含气率为30%,能更好提高破煤岩效率和低渗透煤层渗透性.

高压气液两相射流中产生的气泡随着含气率的升高而逐步增多,单位时间内射流冲击试样的水柱随之增多,所形成脉冲的冲击力更强,致使孔深逐步增大.但当含气率超过一定范围时,冲击压力不能抵消射流密度降低造成的能量损耗时,高压液相射流冲击试样压力便会随着含气率的增高而逐渐减小,以至于孔深也随之减小^[14-15].

2.2 射流压力对射流破煤效果的影响

射流压力是直接影响射流冲击侵蚀试样最主要因素之一,为分析射流压力对高压气液两相射流冲击试样钻孔的影响,分别将射含气率 F_a 、冲击靶距 D_s 、喷嘴直径 D_n 和冲击时间 t 分别设为 $F_a=30%$ ($F_a=0%$ 纯水射流)、 $P_w=10\text{ MPa}$ 、 $D_s=300\text{ mm}$ 、 $D_n=3\text{ mm}$ 和 $t=120\text{ s}$ 并保持不变,对不同射流压力下的高压气液两相射流进行冲击试验,并对同一射流压力进行3~4次冲击试验,试验完成后按1.3节的试验方案测量冲击试样的孔深、孔径和孔容量,分别取其结果的最大值、最小值和平均值绘制曲线图,同时分析了2种射流在不同冲击压力下超声波纵波波速随时间变化.试验结果如图5所示.

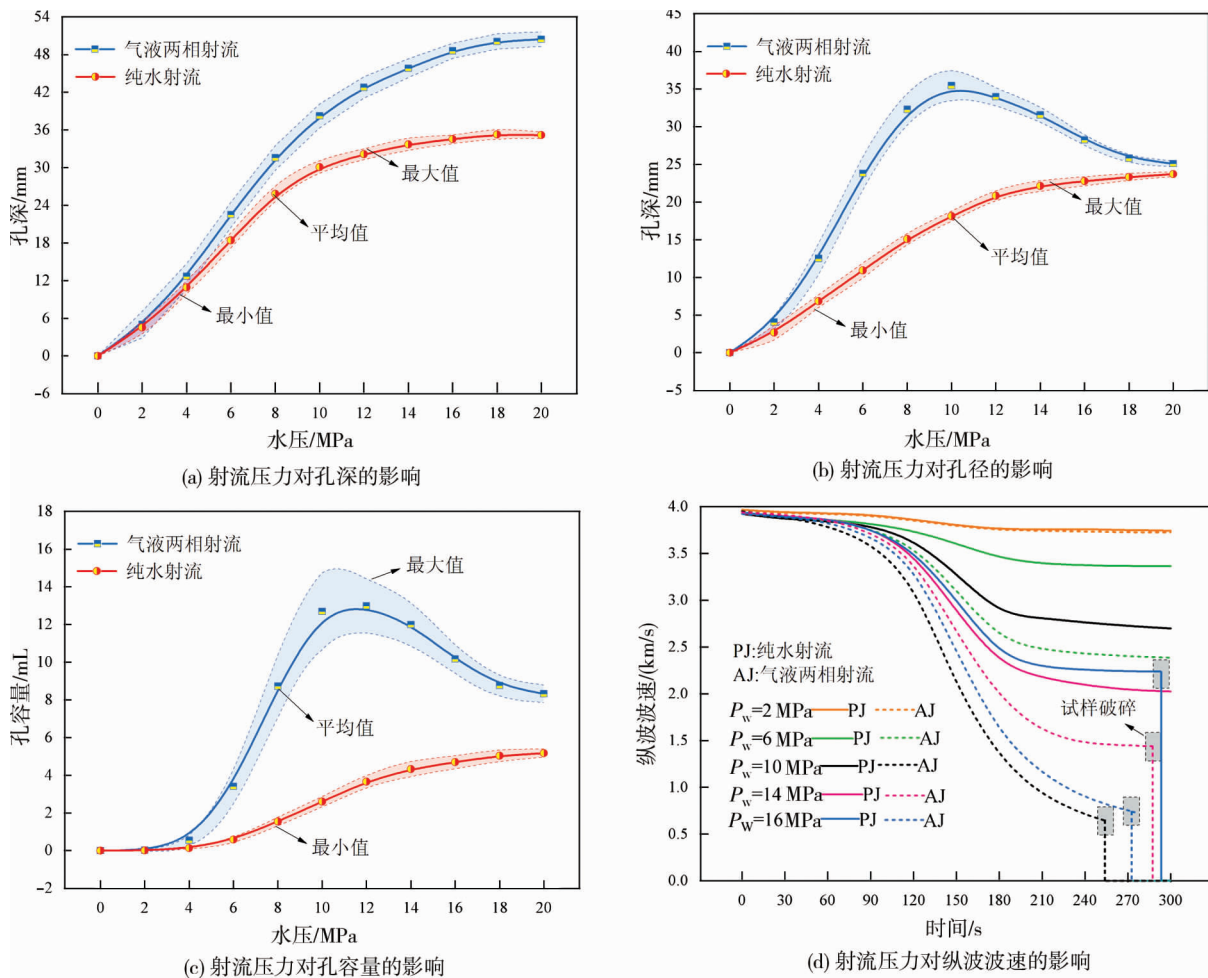


图5 不同射流压力对试样冲击的影响

由图5a可知:孔深随着射流压力的增大而逐步增加,且增长幅度有逐渐减缓的趋势,当射流压力达到20 MPa时,气液两相射流冲击试样的孔深达到50.8 mm后趋于平稳,纯水射流冲击试样的孔深达到35.5 mm后趋于平稳.

由图 5b 可知:气液两相射流冲击试样的孔径随着射流压力的增大有逐步增加后减小的趋势;而纯水射流冲击试样的孔径随着射流压力的增大而逐渐增加,当射流压大于 16 MPa 后,孔径大小达到 22.5 mm 后趋于平稳.当射流水压在 10 MPa 时:气液两相水射流冲击试样孔径是 35.2 mm,而纯水射流冲击试样孔径是 17.3 mm,气液两相射流冲击试样最大孔径约是纯水射流的 2 倍.

由图 5c 可知:孔容量在气液两相水射流冲击试样时随着射流压力的增高先增大后逐步减小,当水压在 11 MPa 左右时,孔容量最大值约是 13 mL,是纯水射流最大值的 3 倍.

由图 5d 可知:纵波波速随不同射流压力冲击试样时间的增加而减小,可见试样内部破裂程度也在变大,形成的裂纹也越多.当射流压力 $P_w = 2$ MPa 时,纵波波速随冲击时间的变化不明显.当 2 MPa $< P_w < 18$ MPa 时,高压两相射流冲击试样的纵波波速比纯水射流降低了很多,且射流压力 $P_w = 10$ MPa 时,冲蚀致破碎冲击时间是最少的;而纯水射流将试样冲蚀破碎的射流压力 $P_w = 14$ MPa,冲击时间 $t = 287$ s.由此可见,在相同试验的情况下,气液两相射流破煤效果明显优于普通纯水射流.

2.3 冲击靶距对射流破煤效果的影响

冲击靶距是指射流出口从喷嘴到冲击试样的距离,是影响射流破煤特性的重要因素之一.为分析冲击靶距对射流破煤效果的影响,试验保持射流含气率 = 30% ($F_a = 0\%$ 纯水射流)、冲击压力 = 10 MPa、喷嘴直径 = 3 mm 和最长冲击时间 $t = 120$ s 不变,分别研究靶距对破煤特性的影响,并对同一冲击靶距进行 3~4 次冲击试验,试验完成后按 1.3 节的试验方案测量冲击试样的孔深、孔径和孔容量,分别取其结果的最大值、最小值和平均值绘制曲线图,同时分析了 2 种射流在不同冲击靶距下超声波纵波波速随时间变化,观察试样宏观上是否破碎,试验结果如图 6 所示.

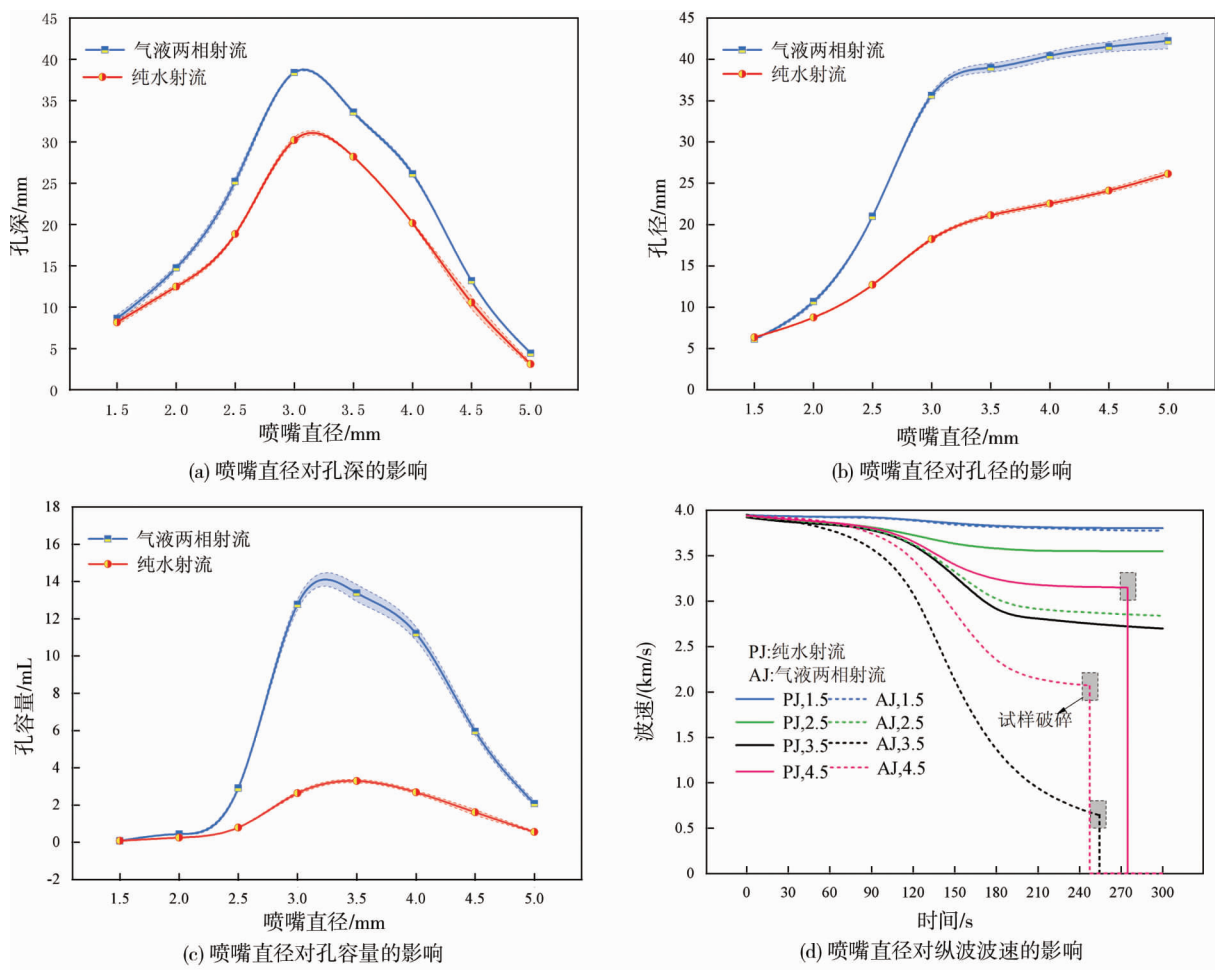


图 6 不同靶距对试样的影响

由图 6a 可知:2 种射流冲击形成的孔深是随着冲击靶距的增大呈现先升高后降低的趋势.当冲击靶距

为 $D_s = 315$ mm 时,孔深达到最大值,气液两相射流最大孔深是 39 mm,而纯水射流的最大孔深为 30 mm.

由图 6b 可知:孔径随着冲击靶距的增大先增大后减小,且气液两相射流孔径一直大于纯水射流.当冲击靶距 $D_s = 310$ mm 时,气液两相射流孔径达到最大值 36 mm,纯水射流也达到最大值是 18.5 mm.

由图 6c 可知:2 种射流孔容量随着靶距的增大呈现先逐步升高后降低的趋势.当冲击靶距 $D_s = 315$ mm 时,气液两相射流孔容量的峰值是 12.7 mL,纯水射流孔容量的峰值是 2.3 mL.

由图 6d 可知:超声波纵波波速随不同靶距冲击试样时间的增大而减小,可见试样内部裂纹增多,裂纹程度达到试样破碎临界值会导致试样破碎.当冲击靶距在 100 ~ 200 mm 时,纵波波速随冲击时间的变化不明显,射流冲击试样变化不明显,可知试样破损的最低冲击靶距是 200 mm.其中 $D_s = 300$ mm 时冲击试样破碎时间最短,而纯水射流不能冲击试样破碎,可见两相射流破煤效果明显优于纯水射流.

2.4 喷嘴直径对射流破煤效果的影响

为分析喷嘴直径对射流破煤效果的影响,试验保持射流含气率 $F_a = 30%$ ($F_a = 0%$ 纯水射流)、射流压力 $P_w = 10$ MPa、冲击靶距 $D_s = 300$ mm 和最长冲击时间 $t = 120$ s 不变,分别研究喷嘴直径对破煤特性的影响,并对同一冲击靶距进行 3~4 次冲击试验,试验完成后按 1.3 节的试验方案测量冲击试样的孔深、孔径和孔容量,分别取其结果的最大值、最小值和平均值绘制成曲线图,同时分析了 2 种射流在不同喷嘴直径下的超声波纵波波速随时间变化,观察试样宏观上是否破碎,试验结果如图 7 所示.

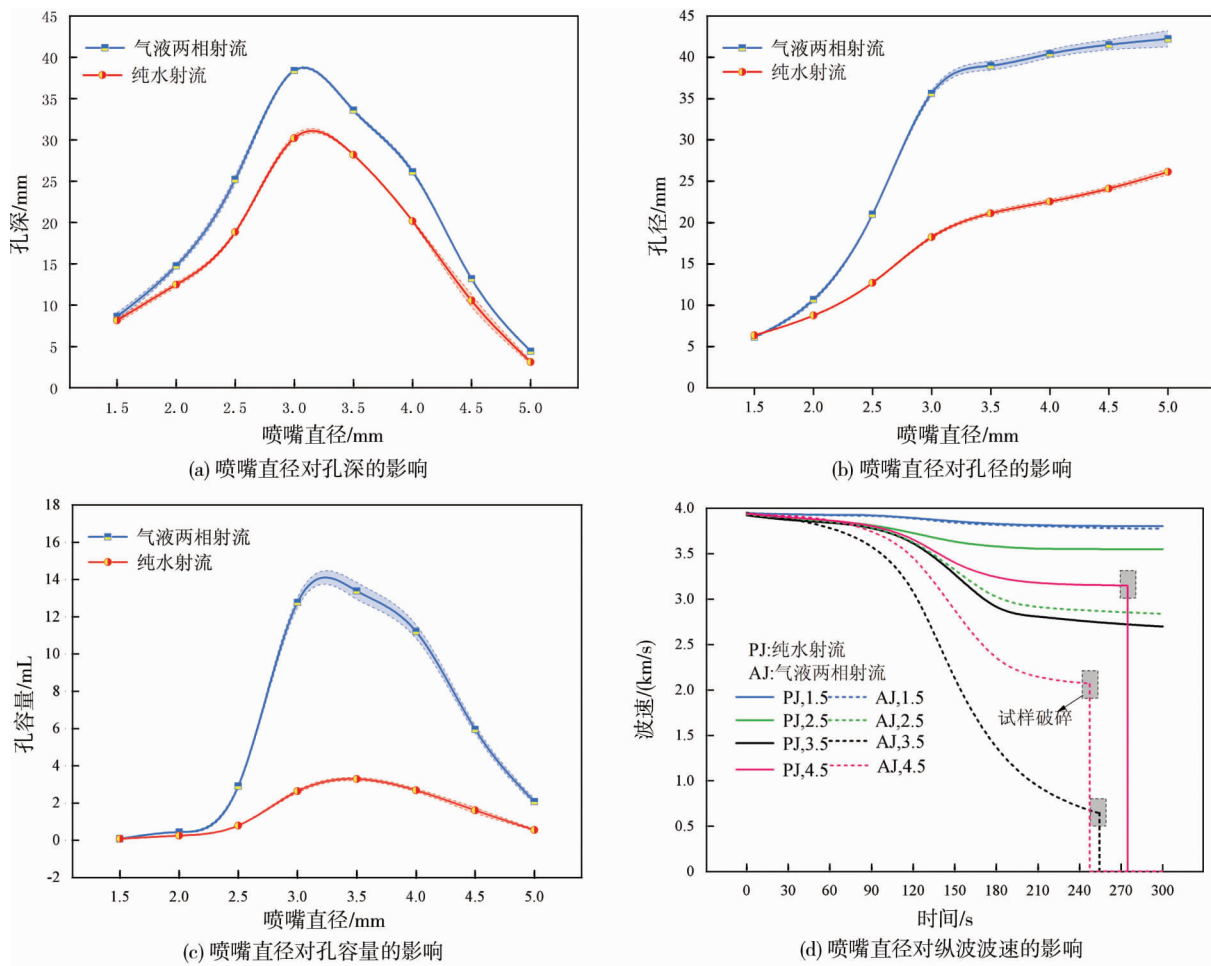


图 7 不同喷嘴直径对试样的影响

由图 7a 可知:2 种射流冲击形成的孔深是随着喷嘴直径的增大呈现先升高后降低的趋势.当喷嘴直径 $D_n = 3$ mm 时,孔深达到最大值,气液两相射流最大孔深是 39 mm,而纯水射流的最大孔深为 31 mm.当 1.5 mm $< D_n < 3$ mm 时,高压气液两相射流和纯水射流形成的孔深差逐渐增大;而当 3 mm $< D_n < 5$ mm 时,孔深差又逐步减小.

由图 7b 可知:在 2 种射流冲击侵蚀的条件下,孔径是随着喷嘴直径的增大而增大,且气液两相射流孔径一直大于纯水射流.当 $1.5 \text{ mm} < D_n < 3 \text{ mm}$ 时,气液两相射流与纯水射流的孔径差逐步增大,且气液两相射流孔径的增长速率明显大于纯水射流.

由图 7c 可知:两种射流孔容量随着喷嘴直径的增大呈现先升高后降低的趋势.当 $D_n = 3.2 \text{ mm}$ 时,气液两相射流孔容量的峰值是 14.0 mL ;当 $D_n = 3.5 \text{ mm}$ 时,纯水射流孔容量的峰值是 3.2 mL .

由图 7d 可知:超声波纵波波速随不同喷嘴直径冲击试样时间的增大而减小,可见试样内部裂纹增多,裂纹程度达到试样破碎临界值会导致试样破碎.当 $1.5 \text{ mm} < D_n < 2.5 \text{ mm}$ 时,纵波波速随冲击时间的变化不明显,射流冲击试样变化不明显,可知试样破损的小喷嘴直径是 2.5 mm ;当 $3.5 \text{ mm} < D_n < 4.5 \text{ mm}$ 时,高压气液两相冲击试样致破碎,其中, $D_n = 4.5 \text{ mm}$ 时冲击试样破碎时间最短.

3 结论

1) 在保持射流压力、冲击靶距及喷嘴直径不变的条件下,含气率 $F_a = 30\%$ 时,射流冲击侵蚀试样形成的孔径、孔深和孔容量均达到最大值.

2) 在保持含气率、冲击靶距、喷嘴直径不变的条件下,当射流压力 $P_w = 10 \text{ MPa}$ 时,超声波纵波波速减小幅度最大,试样内部产生裂隙最多,同时也是将试样冲击侵蚀致破碎的最小冲击力.

3) 在保持含气率、冲击压力、喷嘴直径不变的条件下,当冲击靶距 $D_s = 300 \text{ mm}$ 左右时,射流冲击侵蚀试样形成的孔径、孔深和孔容量均达到最大值,且此时气液两相射流破碎试样所用时间最短.

4) 在保持含气率、冲击压力、冲击靶距不变的条件下,当喷嘴直径 $D_n = 3.5 \text{ mm}$ 左右时,射流冲击侵蚀试样形成的孔深和孔容量均达到最大值,且孔径在喷嘴直径 $D_n > 3.5 \text{ mm}$ 后增大不明显.而气液两相射流破碎试样所用最短时间是在 $D_n = 4.5 \text{ mm}$.

参考文献:

- [1] 林柏泉,吕有厂,李宝玉,等. 高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 959-963.
- [2] 刘勇,卢文玉,李晓红,等. 高压脉冲水射流顶底板钻孔提高煤层瓦斯抽采率的应用研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1115-1119.
- [3] WANG W, LU S Q, LI M J, et al. Coal breakage impact by high-pressure water jet and induced pressure relief and permeability enhancement by hydraulic flushing cavity: mechanism and application[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(22): 2399.
- [4] ZHANG Y J. Study on the theory of high pressure water jet coal breaking and its main controlling factors[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 735(1): 012083.
- [5] 胡欣然. 高压气液两相射流冲蚀破煤岩性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [6] 杨永印,李根生. 超高压水射流破岩及切割实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(1): 36-37.
- [7] 胡东,唐川林,张凤华,等. 进气方式增强气力提升作用的研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(4): 456-463.
- [8] 林柏泉,王瑞,乔时和. 高压气液两相射流多级脉动破煤岩特性及致裂机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 124-130.
- [9] 林柏泉,王正,王瑞. 高压气液两相射流裂纹扩展及致裂机理[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 1-12.
- [10] 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.
- [11] 王瑞. 高压气液两相射流交互动破岩规律及致裂机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [12] 乔时和. 高压气液两相射流瞬态动力破煤特性及微观致裂机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [13] ZHAO J C, GUO D Y. Cracking mechanism of coal under high-pressure water jet and its applications for enhanced coalbed methane drainage[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(15): 427.
- [14] 赵岳然,姜文忠,靳鹏,等. 高压水射流破煤机理研究进展及展望[J]. 煤矿安全, 2022, 53(4): 183-192.
- [15] 张永利,张彦路,李成全. 水射流切割理论研究进展[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1999, 18(5): 503-506.