

磨料质量流量对磨料空气射流破煤效果的影响

乔磊¹ 陈长江^{2*} 张慧栋² 王丽娟² 张利军¹

1 山西高河能源有限公司 2 河南理工大学

DOI:10.32629/etd.v6i5.16892

[摘要] 针对煤矿瓦斯抽采中水力增透技术存在的“水锁效应”、煤体遇水软化及钻孔易坍塌等问题,本文研究了磨料质量流量对破煤效果的影响机制,确定了最优磨料质量流量,并通过实验验证。首先通过CFD-DEM气固两相流耦合,揭示了磨料质量流量对磨料动能的影响规律:随质量流量增加,磨料总动能呈先增后减趋势,且在24g/s时达到峰值。在高河矿E2309工作面展开现场试验,结果显示:相较于水力冲孔,磨料空气射流在保持平均每米出煤量与水力冲孔几乎持平的同时,缩短了封孔时间;试验孔平均抽采较水力孔提升18.68%,平均抽采流量较水力孔提升61.1%。磨料空气射流技术通过消除水锁效应、构建稳定卸压空间,显著提升了松软煤层瓦斯抽采效率与安全性,为煤矿绿色增透提供了可靠技术路径。

[关键词] 磨料空气射流; 松软煤层; 煤层增透; 瓦斯抽采; 水锁效应

中图分类号: Q938.1+4 **文献标识码:** A

Abrasive Mass Flow Rate's Impact on the Coal Breaking Effect of Abrasive Air Jet

Lei Qiao¹ Changjiang Chen^{2*} Huidong Zhang² Lijuan Wang² Lijun Zhang¹

1 Shanxi Gaobe Energy Co., Ltd. 2 ChinaHenan Polytechnic University

[Abstract] Aiming at addressing issues in hydraulic permeability enhancement technology for coal mine gas extraction, such as the "water blocking effect," water-induced softening of coal, and borehole instability, this study investigates the influence of abrasive mass flow on coal-breaking efficiency and determines the optimal abrasive mass flow, validated through experiments. Using CFD-DEM coupled gas-solid two-phase flow simulations, the impact of abrasive mass flow on abrasive kinetic energy was revealed: as the mass flow increases, the total kinetic energy of the abrasive particles first rises and then declines, peaking at 24 g/s. Field tests conducted at the E2309 working face of the Gaohe Mine demonstrated that, compared to hydraulic flushing, abrasive air jet technology achieved nearly the same average coal output per meter while reducing borehole sealing time. Additionally, the average gas extraction volume of the test boreholes increased by 18.68%, and the average gas extraction flow rate rose by 61.1% compared to hydraulic flushing boreholes. By eliminating the water blocking effect and creating a stable pressure-relief space, abrasive air jet technology significantly enhances gas extraction efficiency and safety in soft coal seams, offering a reliable technical solution for green and efficient permeability enhancement in coal mines.

[Key words] abrasive air jet; soft coal seam; coal seam permeability enhancement; gas extraction; water lock effect

引言

瓦斯灾害作为煤矿五大自然灾害之一,是制约我国煤炭安全高效生产的关键难题。其表现形式主要为瓦斯突出与瓦斯爆炸,具有突发性强、破坏性大等特点,严重威胁井下作业人员的安全和矿井的稳定运营^[1]。因此,在煤炭开采过程中,采取行之有效的技术手段对煤层瓦斯进行治理,是实现煤矿安全生产的重中之重。然而我国煤层的透气性普遍较差,绝大多数煤层

属于低透气性、高吸附性的“双低”煤层,其原始透气性系数极低,瓦斯在煤层中的运移阻力大、流速慢,这使得常规的钻孔抽采方式效率低下、预抽周期漫长,严重制约了煤层瓦斯的高效抽采利用^[2]。

目前的煤层增透技术有水力化技术和爆破致裂技术等。水力化技术以水力压裂^[3]和水力割缝^[4]等为代表,爆破致裂技术主要包括深孔预裂爆破^[5-6]和二氧化碳致裂。由于水射流技术具

有非爆破、安全性高及效果直观等优点,被广泛应用于矿井开采领域。然而,水射流技术在应用过程中逐渐暴露出其固有的局限性。水力作用会导致煤体发生润湿效应,大量注入的水分会占据煤体中原有的孔隙空间,导致瓦斯逸出的通道封闭。水分子的竞争吸附作用会抑制瓦斯的解吸,反而可能造成抽采效果的下降,即“水锁效应”^[7-9]。且对于部分遇水易软化的松软煤层,水的浸入会改变煤体的力学性质,进而诱发孔洞坍塌或钻孔堵塞,严重影响瓦斯抽采效果。在井下水资源匮乏或排水困难的矿区,还存在潜在的地下水污染问题^[10]。

鉴于水射流技术的上述缺陷,寻求一种高效、无水、环保的新型替代增透技术已成为行业内的迫切需求。刘勇等^[11]针对瓦斯抽采过程中,采用水力化技术导致出现塌孔等现象,提出了磨料空气射流技术。该技术利用高速压缩空气形成的气固两相射流对煤体进行冲击、切割和破碎,其核心优势在于完全避免了水的使用,从而从根本上消除了水锁效应和煤体遇水软化等问题。磨料空气射流破煤效率主要决定于射流压力和磨料质量流量^[12]。研究表明^[13],提高射流压力可以提高射流能量,但存在极限;提高磨料质量流量可以更充分的利用射流能量,使煤体表面上的高速磨料粒子质量增加,冲蚀磨蚀效应增强,从而显著提升破煤效果。

综上所述,本文采用磨料空气射流技术,通过数值模拟与实验验证结合的方法,探究磨料质量流量对磨料空气射流技术破煤效率的影响,确定最优的磨料质量流量,为磨料空气射流技术的发展奠定了理论和实验基础。

1 数值模拟

1.1 模型建立与网格划分

本文采用ANSYS-Workbench 模块建立数值模拟模型,计算区域包括喷嘴和自由流场区域,喷嘴总长17.5mm,自由流场总长为80mm,直径为40mm。喷嘴结构参数如表1所示,其中 d_1 、 d_2 和 d_3 分别为喷嘴入口、喉部、出口, l_1 和 l_2 分别为喷嘴的收缩段和扩张段。对喷嘴模型和自由流场进行局部加密,计算域的网格总数为98万,平均正交质量大于0.99,质量较高。喷嘴几何参数如表1所示,物理模型及网格划分如图1所示。

表1 喷嘴各部分几何参数

喷嘴尺寸参数	数值/mm
入口尺寸 d_1	12.4
喉部尺寸 d_2	4
出口尺寸 d_3	4.82
收缩段 l_1	5
扩张段 l_2	12.5

1.2 磨料质量流量对磨料加速的影响

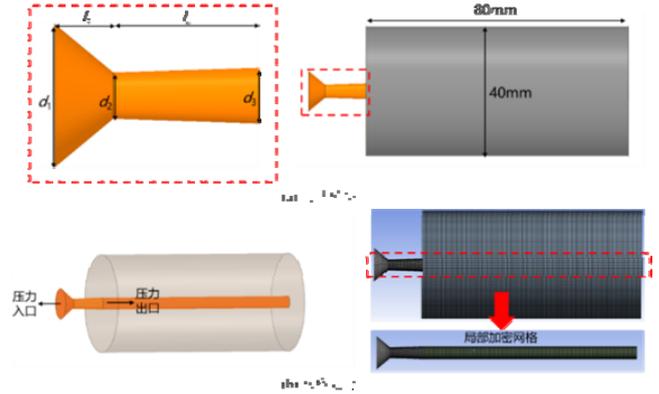


图1 物理模型及网格划分

射流稳定后,提取不同磨料质量流量下射流轴向的入射磨料分布形态如图2所示。可以看出,射流轴心区域集中大量磨料粒子。提取喷嘴内外轴心位置磨料的平均速度如图3所示,可以清晰的看出磨料粒子在不同阶段的加速规律具有明显差异,整体可分为三个阶段。在喷嘴的收缩段,入射磨料在气流推动下持续加速。在此过程中,尽管磨料质量流量不同,但磨料粒子到达喷嘴喉部时的速度均能达到55m/s,这表明入射磨料在喷嘴收缩段内的加速受磨料质量流量影响较小。随后入射磨料进入扩张段,在此阶段继续加速,但加速度呈现逐渐降低的趋势。在喷嘴出口处,不同质量流量下的磨料速度均随磨料质量流量增大而降低。

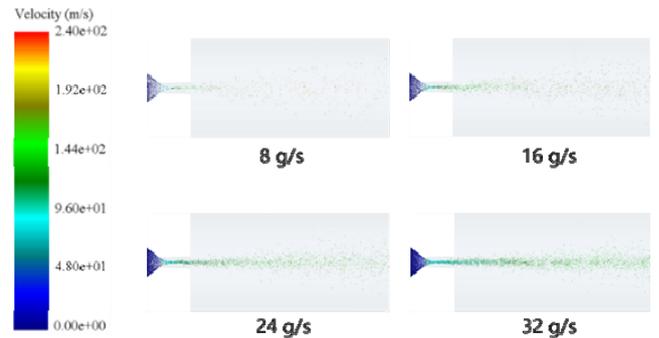


图2 射流轴向的入射磨料分布形态

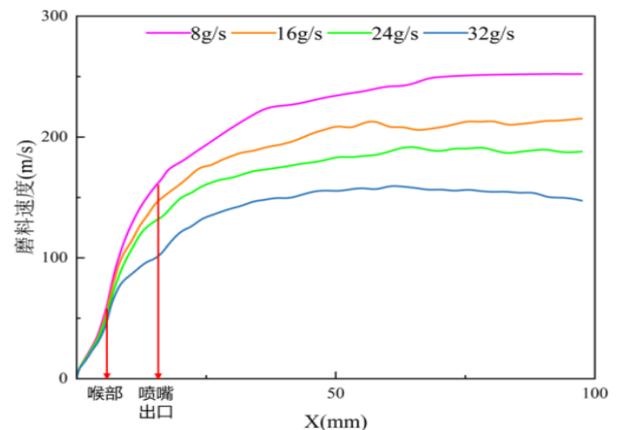


图3 磨料平均速度分布

表2 磨料空气射流实验冲孔数据

孔号	偏角/°	煤段长度/m	磨料质量流量/g·s ⁻¹	冲孔煤量/t	每米出煤量/(t·m ⁻¹)	封孔时间/min
46组3#	90	8.7	8	5.9	0.68	25
51组7#	90	8.8	16	8.9	1.01	29
118组9#	90	7.5	24	10.9	1.45	34
123组3#	90	8.0	32	9.6	1.2	28
46组5#	66	9.0	8	5.9	0.66	31
51组5#	66	9.5	16	10.4	1.09	25
118组3#	65	9.1	24	12.4	1.36	20
123组9#	63	10.2	32	11.4	1.12	35
46组7#	48	9.8	8	7.8	0.8	30
51组3#	48	11.5	16	12.7	1.1	28
118组7#	49	11.0	24	14.6	1.33	32
123组5#	45	10.8	32	13.3	1.23	39

磨料离开喷嘴后进入自由流域,在高速气流的推动下,磨料粒子的速度呈上升趋势。但随着磨料质量流量增大,磨料粒子加速效果减弱。然而,磨料空气射流的破煤效果并非仅取决于速度,作用于煤体的磨料质量同样至关重要。因此,在评价射流破煤能力时,除速度外,还需结合作用于靶体的磨料质量。

1.3 磨料质量流量对磨料动能的影响

根据2.2节的分析,磨料速度并不足以表征射流的破煤能力,还需要考虑磨料质量对射流的动能影响。因此,计算不同磨料质量流量条件下的磨料粒子每秒的动能 E_k ,计算方式如式(1)、(2)。

$$M=m \times t \tag{1}$$

$$E_k = \frac{Mv^2}{2} \tag{2}$$

其中, M 是射流每秒喷射的粒子质量, m 为磨料质量流量, t 是射流喷射时间(1s), E_k 为磨料粒子每秒携带的动能, v 是磨料粒子的速度。

图4展示了不同磨料质量流量下磨料动能在自由流域的变化规律。可以看出,磨料离开喷嘴出口后,磨料动能随靶距增加先上升后趋于稳定,该变化趋势与2.3节中得到的磨料速度变化趋势一致。改变磨料质量流量,磨料粒子动能随之发生改变:磨

料粒子动能随磨料质量流量的增加呈先增后降的趋势,并在磨料质量流量24g/s时达到峰值424.13J/s。这是因为虽然磨料粒子的速度随磨料质量流量增加而降低,但磨料粒子质量的增加导致磨料总动能呈上升态势。例如在磨料质量流量为24g/s时,虽然单颗粒子加速不充分导致磨料速度较低,但此时磨料总动能达到最大。一旦磨料质量流量超过该临界值,磨料速度下降对其动能的影响占据主导,进而导致总动能降低。

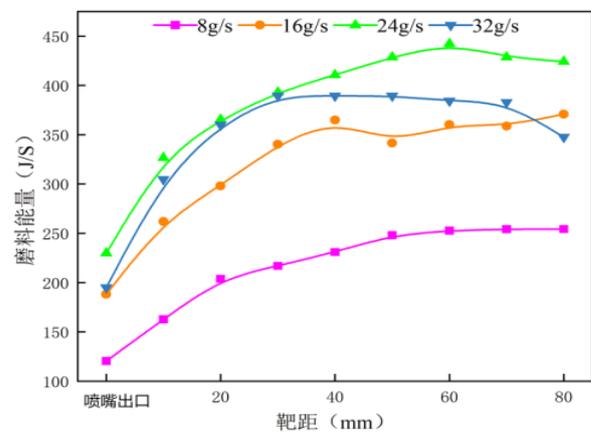


图4 磨料动能在自由流域的变化

[基金项目]

(1)河南省科技攻关项目(252102320337); (2)基本科研业务费专项项目(NSFRF2502012); (3)国家资助博士后研究人员计划(GZC20250004)。

[参考文献]

[1]张超林,王培仲,王思元,等.我国煤与瓦斯突出机理70年发展历程与展望[J].煤田地质与勘探,2023,51(02):59-94.

[2]林柏泉,杨威,刘统.深部高突煤层典型特征、诱突机制及防治对策[J].煤炭学报,2025,50(01):311-325.

[3]高文敏.特厚煤层大采高煤层水力压裂技术优化与效果分析[J].煤矿现代化,2025,34(06):72-76.

[4]王浩昌,侯典臣.坚硬煤层超高压水力割缝增透技术研究[J].科技创新与应用,2025,15(24):65-67+72.

[5]付文刚.地面深孔预裂爆破技术应用[J].煤炭技术,2025,44(09):75-79.

[6]徐海声,张智宇,李煜程,等.基于模糊数学法的露天深孔预裂爆破效果综合评价[J].有色金属(中英文),2025,15(02):307-314.

[7]任晨曦,李兵兵,刘雅静,等.不同含水饱和度煤储层孔隙内水锁演化特征研究[J/OL].煤炭科学技术,1-12[2025-09-25].

[8]黄林岗,林凌,罗文嘉.煤层气中甲烷扩散及水锁效应的分子动力学研究[J].煤炭学报,2023,48(11):4124-4134.

[9]刘军,杨通,王立国,等.煤层水锁效应的消除及其对甲烷解吸特性的影响[J].煤炭科学技术,2022,50(09):82-92.

[10]王玮,邓治国,姚荣胜.废弃煤矿矿井水污染调查技术方案[J].西部探矿工程,2024,36(06):117-119.

[11]刘勇,何岸,魏建平,等.水射流卸压增透堵孔诱因及解堵新方法[J].煤炭学报,2016,41(8):1963-1967.

[12]魏建平,蔡玉波,张铁岗,等.低压磨料空气射流切割硬岩评价模型及应用[J].煤炭学报,2025,50(01):349-359.

[13]魏建平,校朋伟,张慧栋,等.磨料水射流旋转切割煤岩最优参数匹配模型研究[J].煤炭科学技术,2025,53(01):192-202.

作者简介:

陈长江(1991--),男,汉族,博士,河南理工大学,副教授,研究方向:瓦斯防治与治理。