

矿用凝胶喷射装置喷雾性能实验研究

厉琦^{1*}, 黄彦军^{2#}

¹山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

²山西潞安集团司马煤业有限公司, 山西 长治

收稿日期: 2026年1月14日; 录用日期: 2026年2月19日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

我国煤炭资源极为丰富, 煤本身作为可燃物, 在采空区中极易由于漏风等原因导致自燃。凝胶被广泛应用于煤矿防灭火领域, 但凝胶本身流动性差, 且较为粘稠, 在采空区中难以大范围扩散。基于伯努利原理, 本文提出利用文丘里管将凝胶液进行破碎雾化, 使其呈液滴状分散, 扩大覆盖面积, 该装置利用气体驱动, 可以利用矿上注氮管道提供动力, 不外接能源。为探究文丘里管在进行气体引射液体凝胶时的吸液与雾化相关性能, 本文进行了定制射流器的吸液及雾化性能实验, 并得到了雾化量以及雾化扩散角等数据, 发现同样的射流器, 增大入口压力时雾化量逐渐增大, 而同样的入口流量下, 雾化量随喉管直径的增大而增大, 同时, 不同喷嘴直径装置下的喷射角规律相似, 说明喷射角受到喷嘴直径的影响较小, 受到喉管直径与喷嘴直径相对关系的影响较大。

关键词

矿用凝胶, 喷雾装置, 雾化量, 扩散角

Experimental Study on Spray Performance of Mining Gel Spraying Device

Qi Li^{1*}, Yanjun Huang^{2#}

¹College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²Shanxi Lu'an Group Sima Coal Industry Co., Ltd., Changzhi Shanxi

Received: January 14, 2026; accepted: February 19, 2026; published: March 18, 2026

Abstract

China is extremely rich in coal resources. As a combustible material, coal is prone to spontaneous

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 厉琦, 黄彦军. 矿用凝胶喷射装置喷雾性能实验研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(2): 318-327.

DOI: 10.12677/me.2026.142034

combustion in mined-out areas due to factors such as air leakage. Gel is widely used in the field of coal mine fire prevention and suppression, but due to its poor fluidity and relatively viscous nature, it is difficult to spread over a large area in mined-out areas. Based on Bernoulli's principle, this paper proposes using a Venturi tube to break and atomize the gel liquid into droplets, thereby expanding its coverage area. This device is driven by gas and can utilize the nitrogen injection pipeline on the mine to provide power, without requiring external energy sources. To investigate the liquid absorption and atomization performance of the Venturi tube when injecting liquid gel through gas ejection, this paper conducted experiments on the liquid absorption and atomization performance of a customized injector, obtaining data such as the amount of atomization and the atomization diffusion angle. It was found that for the same injector, the amount of atomization gradually increases with increasing inlet pressure. At the same inlet flow rate, the amount of atomization increases with the increase in throat diameter. Additionally, the spray angle patterns under different nozzle diameters are similar, indicating that the spray angle is less affected by the nozzle diameter and more affected by the relative relationship between the throat diameter and nozzle diameter.

Keywords

Mining Gel, Spraying Device, Atomization Volume, Spray Angle

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭资源在我国的经济发展中占据极其重要的地位。我国能源储量“富煤、贫油、少气”的特点决定了煤炭的主体能源地位,煤炭在一次能源消费中占比保持在 57%以上,在一次能源生产中占比一直高于 70% [1]。《中国可持续能源发展战略》研究报告显示,不可再生能源在自然能源中占比仍然很高,在将来很长一段时期内仍然难以改变我国以煤炭为主的能源消费结构,不能否认煤炭资源不可或缺的作用 [2]。在我国有 130 余个大中型矿区均受自然发火威胁,总体呈现北多南少的趋势;具有煤层自然发火倾向的矿井占 54%,最短自然发火期 < 3 个月的矿井占 50%以上 [1]。

文丘里射流器在工业上有着极其广泛的应用 [3] [4], 因为其优秀的气液混合效率及质量, 常被应用于增氧曝气池 [5]-[7]、喷灌施肥 [8]-[10]、污水处理 [11]-[13] 等, 在很多行业都发挥着举足轻重的作用。文丘里射流器的内部流场通常由收缩段、真空部、喉管、扩散段组成 [14]-[16], 当流体从入口进入后, 收缩段管径不断缩小, 因为流体质量守恒, 体积大致保持不变, 同样的体积单位时间内需要穿过越来越小的管径, 因此流速逐渐加快。依据伯努利原理 [17] [18], 流速大的地方压强小。在文丘里管中, 流速最大的地方是收缩段最窄处到真空部的入口, 因此在真空部会产生一定程度的负压, 被吸流体在大气压的作用下就会被“压”入真空部。当被吸流体在真空部流动过程中遇上喷嘴出口高速喷出的流体时, 二者就会发生剧烈相互作用, 最终混合然后从出口喷出。

目前工业上应用文丘里射流器一般是采用液体引射气体的形式 [19]-[21], 如增氧曝气池是在水进入曝气池之前吸收氧气形成一个个氧气泡, 人工增大水的含氧量; 喷灌施肥是通过水来吸收肥液, 混合均匀形成有一定浓度的肥液进而灌溉施肥 [22] [23]; 污水处理是通过污水吸收一些能够使污水中的有害成分发生絮凝的物质, 进而在污水中生成沉淀排出, 起到净化的作用 [24]。气体引射液体相对较少, 更不要说利用文丘里管喷射液体凝胶, 经过装置处理后的凝胶呈雾态漂浮, 有利于液体的扩散, 而扩散性能在一

定程度上由雾化性能决定[25]。因此,有必要对此展开研究,并探寻在不同入口条件下雾化性能的相关规律。本研究有望为凝胶材料在采空区中的应用提供一种新思路,对增强采空区煤自燃防治水平、提高煤炭资源开采安全性有重要意义。

2. 实验部分

2.1. 实验装置

在射流器的使用中,入口气体的压力与流量条件通常决定了射流器是否可以正常对流体进行引射[26]-[28]。依据论文资料中关于射流器的尺寸与结构参数[29]-[33],本研究选取市面上常用的一种耐腐蚀材料 EPVC,通过参数定制得到我们实验使用的射流器,根据这几款射流器测试得到气体引射液体的引射性能。尽管有关气体引射液体、液体引射气体、气体引射气体的相关研究已经十分成熟,有很多研究甚至已经得到了广泛应用,但是针对气体引射液体凝胶材料是否具备可行性、能产生什么样的效果以及是否实用的研究仍存在空白。表 1 展示了本研究所用实验材料以及仪器的型号与来源。所有化学试剂均达到分析纯,且在实验过程中未经过进一步纯化处理直接使用。

实验装置的实物图如图 1 所示。

Table 1. Experimental materials and instruments

表 1. 实验材料与仪器

序号	名称	类型	厂家
1	水玻璃(WG, 固含量 34%)	主材料	天津致远
2	空压机	实验设备	上海风豹
3	流量计	实验仪器	南京顺来达
4	量筒	实验仪器	上海精科
5	压力计	实验仪器	上海彤炜
6	定制装置	实验设备	江苏万晟源



Figure 1. Physical diagram of the device

图 1. 装置实物图

实验装置为设计好参数之后定制的产品,从喷嘴直径可以分为 4 mm 和 6 mm 两种。其余变化的参数还有收缩角、喉管直径、扩散角,整体参数的取值如表 2 所示。

2.2. 实验系统搭建

实验系统包括空压机、流量计、压力计、量筒以及装置,并通过手机来获取喷射时间与喷雾形态。空压机连接流量计,通过管道连接三通,三通的一个口连接压力计,另一个口接上文丘里管,文丘里管放在离地面有一定高度的桌面上,喷口在桌面边缘,文丘里管的吸液口接上塑料管,塑料管另一端插入量筒底部,量筒中装好满量程液体凝胶,搭建起整个喷射系统。

Table 2. Structural parameters of different devices**表 2.** 不同装置的结构参数

装置序号	喷嘴直径/mm	收缩角/°	喉管直径/mm	扩散角/°
#1	4	10	6	6
#2	4	15	8	9
#3	4	20	10	7
#4	4	25	12	10
#5	4	30	14	8
#6	6	10	8	7
#7	6	15	10	10
#8	6	20	12	8
#9	6	25	14	6
#10	6	30	6	9

喷射背景采用黑色幕布, 由于喷出来的液体在视频中呈现白色雾状, 黑色背景可以较好地与喷雾形成对比, 方便分析, 装置喷射方向平行于幕布面, 手机在实验时从侧面垂直于喷射方向进行拍摄, 来获取喷口的喷射形态, 拍摄时手机置于与装置等高的稳定三脚架上。

2.3. 实验方法

1) 装置吸液速率测量

称取水玻璃, 根据矿用凝胶配方, 配制水玻璃溶液若干备用, 水玻璃溶液比重约为 1.1, 常温下(25℃)粘度为 1.003 mpa·s; 打开空压机, 等待造气完成, 使用量筒量取 1000 mL 水玻璃作为喷射液来源; 空压机造气完成后, 将空压机出口阀门调到最大, 调节空压机减压阀及流量计阀门, 在稳定喷射的情况下, 使流量计示数符合实验设计, 并记录此时的压力值, 该压力值即为在该流量下装置稳定喷射时入口的压力值 P; 然后关闭空压机出口阀门, 保持其他阀门不变, 将量筒内液体添加到实验开始前水平, 并记录刻度 V0; 等待空压机造气完成, 同时按下秒表并打开空压机出口阀门到最大, 观察流量计示数, 在流量计示数下降时, 同时停下秒表并关闭空压机出口阀门, 记录此时的刻度 V1, 两个体积的差值即为这段时间的吸液量。由于装置内部存有一部分液体, 实验前这部分液体是不存在的, 实验后这部分液体依旧算在没有被消耗的液体中, 在关闭空压机出口阀门时, 这部分液体会发生回流, 因此, V1 需要在回流结束后再读数。

2) 装置喷雾状态记录

水玻璃溶液经过雾化后在空气中呈现白色, 浅色背景无法凸显出喷雾形态, 因此在实验时使用黑色幕布作为喷射背景, 并通过遮光帘尽量减少侧向光的照射, 以使喷雾形态尽量清晰, 同时将手机垂直于背景幕布以及喷射方向布置, 使手机摄像头正对喷雾区域, 使用支架保证稳定。实验时, 依旧按照水玻璃:水 = 1:2 的质量比制备若干水玻璃溶液备用; 在空压机造气完成后, 将空压机出口阀门调到最大, 调节空压机减压阀及流量计阀门, 在稳定喷射的情况下, 使流量计示数符合实验设计; 然后关闭阀门, 将量筒内液体加到实验前水平, 开启手机录像, 然后开启空压机阀门到最大, 喷射一段时间后关闭阀门, 保存录像。

喷雾试验得到的是喷雾的影像资料, 后续对该资料进行如下处理:

首先, 通过随机挑选视频的不同时刻进行截图, 得到不同时刻的喷雾图像, 并截取还未开始喷射时

的背景图像;

其次, 使用 Diffimg 软件, 对比喷雾图像与背景图像, 得到去掉背景的背景图像;

之后, 通过 Image pro plus 软件进行二值化处理, 把所有存在雾的地方标记为白色, 所有没有雾的地方标记为黑色, 最终通过角度测量得到喷射角结果。

其中一组实验进行的三次实验结果几乎相等, 误差可以忽略不计, 可以认为在流量计示数不变, 空压机储气罐余量充足, 且实验前量筒内液体刻度不变的前提下, 实验过程中喷射速率即保持不变, 因此可以通过手机先计时再录像的方式, 得到一组实验的喷射速率与喷雾形态。

3. 结果与分析

3.1. 喷嘴直径 4 mm 的装置入口条件对吸液速率的影响

图 2 展示了不同入口流量下装置吸液速率与入口压力。从图中可以看出, 吸液速率与入口流量呈现正相关。同时, 在流量达到 $4.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 后, 装置#3 吸液速率有明显的上升, 流量到了 $4.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 后, 装置#4 的吸液速率也上升到了与#3 同样的水平。这是因为喉管直径较小的装置受限于喉管的流通面积有限, 气体引射液体上来之后液体的流通面积较小, 即使再大的气体流量也没法让吸液量升到比较高的水平, 因此从装置#1 到装置#2 虽然随着气体流量的增加, 吸液速率上升速度加快但是上升程度有限; 从装置#3 开始, 喉管直径进一步扩大, 被吸上来的液体有更大的流通面积, 能够支撑大规模的引射液体流动, 因此吸液速率显著上升。

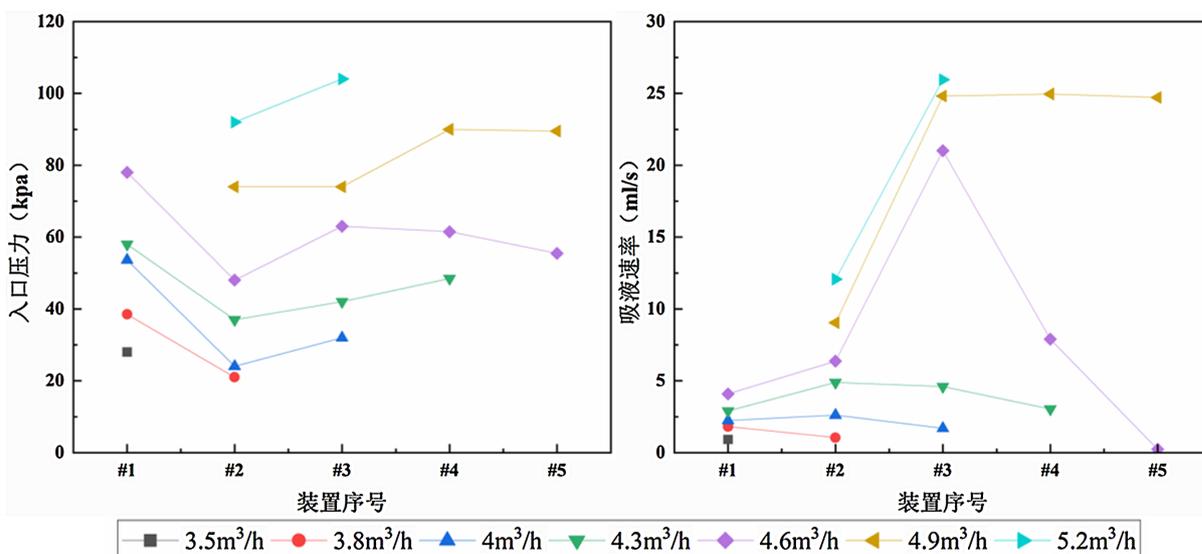


Figure 2. Device liquid suction rate and inlet pressure under different flow rates

图 2. 不同流量下装置吸液速率以及入口压力

对于入口压力而言, 整体呈现先下降后上升的趋势。这是因为收缩角小的时候, 收缩段长度较长, 摩擦阻力大, 导致入口压力较大; 而当收缩角增大到一定程度时, 气体撞击收缩段管壁时, 管壁的作用力以与气体运行相反的分力为主导, 导致阻力重新增大, 入口压力增大。喉管和喷嘴的直径差异也会对入口压力产生影响, 当它们之间差异较大时, 喷嘴中的气体进入喉管, 产生的负压配合大气压将液体压入装置, 液体进入喉管后有足够的空间进行流动, 不需要与气体争夺喉管内的流动面积, 表现就是阻力降低, 在喷嘴直径 4 mm 装置中的体现就是, 装置#2 的入口压力突然降低。

3.2. 喷嘴直径 6 mm 的装置入口条件对吸液速率的影响

射流器能够产生自吸液效果主要依赖的就是高速气体, 作为装置中关乎气体加速效果的重要参数, 喷嘴直径和收缩角同样影响着气体加速的最终效果。相比收缩角而言, 喷嘴直径对气体的速度影响更为直接, 一般认为, 喷嘴直径越小越有利于气流的加速过程, 但是喷嘴直径太小也可能导致阻力太大反而达不到想要的效果。因此, 有必要再针对大喷嘴直径下的气流与喉管直径的相互作用进行研究, 本实验选用了喷嘴直径 6 mm 的装置进行。

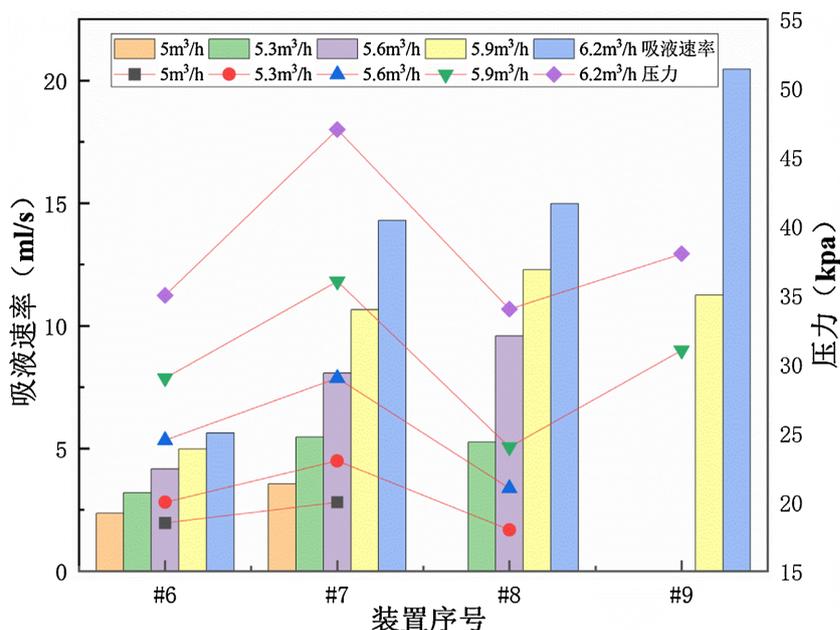


Figure 3. Liquid suction rate and inlet pressure of device with nozzle diameter of 6 mm
图 3. 喷嘴直径 6 mm 装置的吸液速率与入口压力

图 3 展示了喷嘴直径 6 mm 装置在不同入口流量下的装置吸液速率与入口压力。从图中可以看出, 随着入口流量的增长, 吸液速率和入口压力也在增长。同时, 随着装置序号的增加, 装置入口压力先增加, 然后在装置#12 有明显下降, 且流量越大下降趋势越明显, 随后再次增加, 吸液速率同样随着装置序号的增加而上升。这里影响入口压力的因素共有三个: 收缩段长度导致的摩擦阻力、收缩段收缩角导致的壁面轴向反作用力, 以及吸上来的液体与气体争夺流动区域表现出来的流动阻力。装置序号#6 的收缩段较长, 摩擦阻力大, 但是收缩角小, 因此壁面轴向反作用力弱, 喉管和喷嘴的直径差较小, 导致流通截面积差较小, 因此气液争夺流动空间的效应显著, 因此装置#6 的入口压力主要来源为摩擦阻力以及气液争夺流动空间表现出来的流动阻力; 装置#7 的收缩段长度明显缩短, 由长度导致的摩擦阻力显著降低, 收缩角增大, 轴向反作用力增强, 同时喉管和喷嘴的直径差开始增大, 在气体需要的流通面积不变的前提下, 液体流通面积有所增加, 但是增加有限, 这时入口压力变化的主导因素是收缩段的轴向反作用力, 因此压力上升; 装置#8 的收缩段长度进一步缩短, 不过随着收缩角的逐渐增大, 缩短的长度逐渐有限, 由此导致的阻力效应变化也逐渐减弱, 收缩角增大会导致收缩段轴向反作用力进一步增强, 喉管和喷嘴的直径差达到了一倍, 喉管流通面积变为喷嘴的四倍, 这时留给吸上来的液体的截面积就非常大了, 因此由气液争夺流通面积表现出来的流动阻力骤降, 这时入口压力变化的主导因素即为流动阻力, 因此入口压力显著降低; 装置#9 的收缩段长度达到最短, 阻力效应可以不考虑, 收缩角达到最大, 轴向反作用

力达到最大, 喉管和喷嘴的直径差进一步扩大, 但是这时的喉管流通面积对于被吸液体和气体来说就太大了, 不需要这么大的空间, 因此喉管截面积增加导致的流动阻力减小的效应有限, 这时入口压力变化占据主导, 又成了收缩段轴向反作用力。

3.3. 喷嘴直径 4 mm 的装置入口条件对喷射角的影响

作为雾化装置, 吸液速率决定了雾化的效率, 入口压力决定了雾化消耗的能量, 而喷射角一定程度上决定了雾化液的扩散性能。因此, 有必要对装置的喷射角进行一定评估以了解它们的相关性能。

图 4 展示了喷嘴直径 4 mm 的装置在不同流量下的喷射角大小变化。从图中可以看出, 随着装置序号的变化, 喷射角呈现先减小后增大的趋势, 但是最低点有明显不同, 且流量越大, 喷射角拐点越向序号大的装置移动, 因此喷射角的影响因素不只是装置的某个参数, 而是参数影响下的物理性能变化。

通过不同流量下喷射角的低点的移动, 认为它与吸液速率的变化呈现高相关性, 同时与气液之间的碰撞也存在关联。在喉管与喷嘴直径差小的时候, 由于气液争夺流动通道十分剧烈, 因此在不同入口流量下气液碰撞强度均较大, 气液雾化效果较强, 雾化角较大; 喉管直径增大到装置#2 时, 在入口流量达到 4.3 m³/h 时, 达到该流量在不同装置下的最大吸液量, 但是气液碰撞减少导致雾化效果减弱, 因此雾化角急剧减少; 装置序号继续增加, 喉管直径增加的同时扩散角也增加, 这时雾化效果较差, 但是由于扩散角增大, 喷射角有所增大, 在这个上升过程中主要影响喷射角的就是扩散角的大小。在入口流量达到 4.6 m³/h 和 4.9 m³/h 时, 随装置序号的增大, 喷射角的变化原因大致相同。在实验数据中, 不同流量对应的最低喷射角的装置也在变化, 原因是: 装置#2 在入口流量较低时, 会出现雾化不充分乃至根本没有雾化的情况, 导致出口液体部分以流淌方式出来, 喷射角降低; 入口流量升高后, 更多的液体被吸入, 有机会与气体碰撞参与雾化过程, 因此喷射角逐渐升高, 但是在喉管直径继续扩大时还会面临雾化不充分甚至没有雾化的问题, 循环往复, 就呈现出流量越大, 喷射角的最低点逐渐向装置序号增大的方向移动的情况。

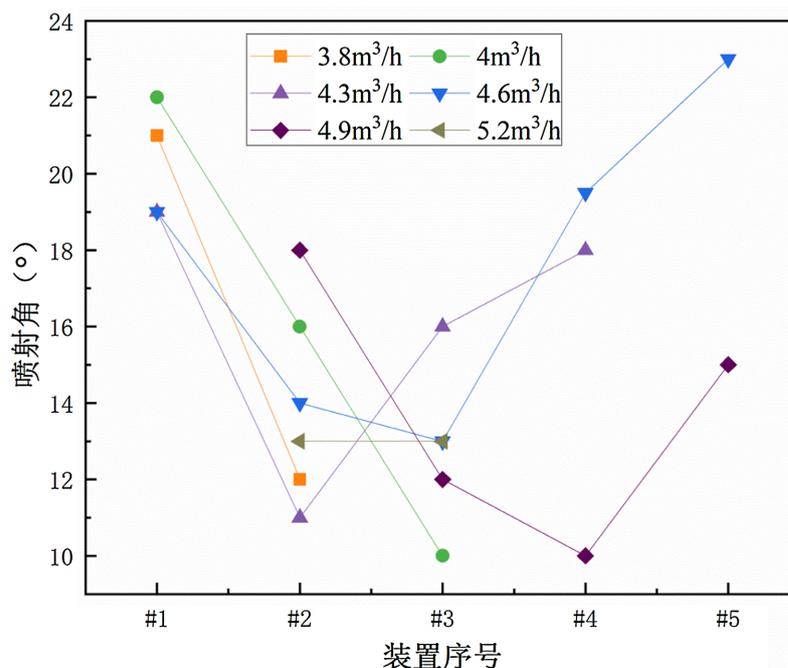


Figure 4. Diagram of spray angle variation for a device with a nozzle diameter of 4 mm
图 4. 喷嘴直径 4 mm 装置的喷射角变化图

3.4. 喷嘴直径 6 mm 的装置入口条件对喷射角的影响

图 5 展示了喷嘴直径 6 mm 的装置在不同入口流量下的喷射角。可以看出, 喷嘴直径 6 mm 的装置整体上随着喉管直径的增大, 喷射角逐渐下降, 流量 $5.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 在装置#8 处出现了喷射角的低点, 同时, 稍高的流量 $6.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 在装置#9 之前一直呈下降趋势。

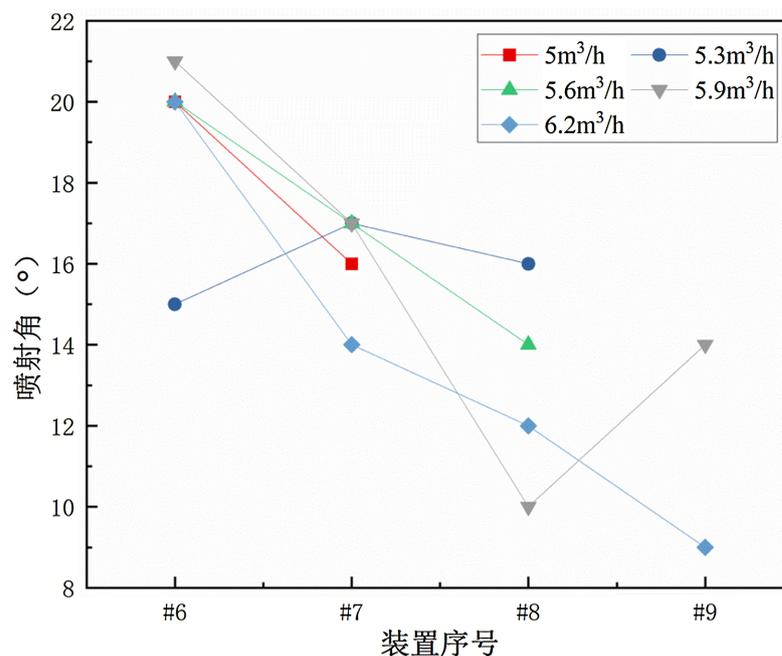


Figure 5. Diagram of spray angle variation for a device with a nozzle diameter of 6 mm
图 5. 喷嘴直径 6 mm 装置的喷射角变化图

整体看下来, 喷嘴直径 6 mm 的装置与喷嘴直径 4 mm 的装置在喉管直径较小时的规律相同。如果按照喷嘴直径 4 mm 的装置的喷嘴直径变化规律推测的话, 应当有喷射角的上升, 且越高流量的喷射角的低点装置序号越大, 而在图像上流量 $5.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 的喷射角也确实出现了上升, 同时流量 $6.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 的喷射角依旧在下降, 说明喷嘴直径 6 mm 的装置和喷嘴直径 4 mm 的装置喷射角规律相似, 都与喉管直径和喷嘴直径在数值上的相对关系有关。

4. 结论

1) 通过喷嘴直径 4 mm 的装置在不同入口流量下的吸液速率与入口压力变化, 得到装置吸液速率与入口压力不是仅受到某一单一因素的影响, 而是受到多个因素协同影响。吸液速率最显著的影响因素就是喉管直径与喷嘴直径的相对大小, 而入口压力受到收缩角和喉管直径与喷嘴直径相对大小的影响都很显著, 区别就是收缩角的影响是直接的, 喷嘴直径和喉管直径相对大小的影响是通过影响吸液量来间接实现的。

2) 通过对比喷嘴直径 4 mm 的装置和喷嘴直径 6 mm 的装置在不同入口流量下的吸液速率与入口压力变化, 得到了不同喷嘴直径下的装置相关性能差异。喷嘴直径 6 mm 的装置相比喷嘴直径 4 mm 的装置需要更高流量的气体驱动, 同时入口压力明显降低, 且在入口气体流量有限的前提下, 吸液速率有一定的减少。

3) 对两种不同喷嘴直径下装置的喷射角进行对比, 发现不同直径下喷射角的变化趋势相似, 变化范围也接近, 说明喷嘴直径对喷射角并没有太大影响, 影响更大的是扩散角和喉管与喷嘴的直径比值。

基金项目

本论文依托多孔固碳颗粒在采空区的架桥堵漏与温敏释惰防火机制(52374216); 采空区固碳颗粒架桥堵漏与温敏释放 CO₂ 预防 - 抑制 - 定位火源机制(ZR2023MEE074)提供资金支持。

参考文献

- [1] 李学军. 矿井火灾分析及防治技术[J]. 大众标准化, 2025(22): 65-67.
- [2] 高宏杰. 煤炭行业发展现状和供需形势分析[J]. 中国煤炭工业, 2022(3): 75-77.
- [3] 杨亚丽. 基于水力空化的水化反应器反应强化特性研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2025.
- [4] 段稀凡. 浸没式旋转填充床强化液液非均相混合及应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- [5] 庄立世. 增氧曝气净水设备水下曝气装置结构优化与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [6] 孙新城, 陈建能, 李鹏鹏. 射流式增氧机创新设计及试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(1): 52-57.
- [7] 杨春玲. 新型离式螺旋曝气设备气液两相流数值模拟及试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- [8] 沈振华, 刘建瑞, 高网大, 等. 50ZB-30C 型射流式自吸喷灌泵的设计与试验[J]. 流体机械, 2009, 37(4): 1-4.
- [9] 汪群. 射流式离心泵增设出水挡板对自吸性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [10] 周贵平. 射流式自吸离心泵的研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2006.
- [11] 刘志, 邓智, 林海通. 高效多级循环吸附技术在含油污水中的应用[J]. 山东化工, 2025, 54(10): 245-248.
- [12] 刘美钰. 基于多相流 CFD 仿真的废三元催化剂射流浸出流场特性研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2025.
- [13] 屈惠茹. 微气泡发生过程及其对含油污水气浮效果的影响[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2023.
- [14] 安晓超, 白雨昕, 谢晓哲, 等. 电厂烟气脱碳用文丘里射流器气液两相试验与数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 442-449.
- [15] 安晓超. 文丘里射流器气液两相流动数值模拟与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京石油化工学院, 2022.
- [16] 代文飞. 复合式浮选搅拌装置喷射器吸气性能的模拟和试验研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [17] 吕谦, 李晓明, 姜健. 增材收扩段特征件磨粒流光整 CFD 仿真与工艺参数研究[J/OL]. 制造技术与机床: 1-8. <https://link.cnki.net/urlid/11.3398.th.20260106.1421.018>, 2026-01-09.
- [18] 李志鹏, 方明, 孙龙泉, 等. 小球入水空泡内外流场同步测量实验教学设计与实践[J/OL]. 实验室研究与探索: 1-6. <https://link.cnki.net/urlid/31.1707.T.20260104.0856.018>, 2026-01-09.
- [19] 张欣悦. 基于射流强化技术硼泥碳化法制备碱式碳酸镁的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2025.
- [20] 褚付州. 射流反应器数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [21] 李尤. 臭氧气液射流传质技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [22] 袁琴. 水肥一体化育苗技术在松树育苗中的应用与管控研究[J]. 种子世界, 2025(12): 222-224.
- [23] 闫敏. 滴灌水肥一体化下玉米大豆间作水氮耦合效应研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2025.
- [24] 李开红, 于娟, 穆亦欣, 等. 臭氧催化氧化技术在污水深度回用中存在问题研究[J]. 炼油与化工, 2025, 36(6): 83-88.
- [25] 马梁, 董跃路, 韩祉炫, 等. 结构参数对无反馈自激扫掠喷嘴流动特性影响[J/OL]. 航空动力学报: 1-13. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20250061>, 2026-01-09.
- [26] 王辉. 射流-管道-跌落组合调浆装置结构参数及工作机制优化[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.
- [27] 罗朝椿. 射流先导组流控液振装置关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2025.
- [28] 李佳志. 射流脉冲式冷却器内气固流动及传热特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2025.
- [29] 袁舒欣, 唐亚鸣, 杨刚, 等. 雾化降尘水炮文丘里喷管的参数设计[J]. 机械制造, 2017, 55(3): 24-27.
- [30] 汪韶华, 姜涛, 杨虎. 洗消消防车用文丘里射流器的吸气性能分析[J]. 专用汽车, 2024(3): 59-63.

- [31] 苗壮. 自吸式文丘里管引射特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [32] 许多武, 宋卫堂. 射流器臭氧-水混合数值模拟及喉管优化[J]. 中国农学通报, 2008(10): 549-553.
- [33] 钟涛, 潘社卫. FLUENT 数值模拟法优化射流器结构的研究[J]. 矿冶, 2013, 22(2): 91-93, 107.