引文格式:薛羽宁,高贵军,韩振国,等. 医用雾化喷嘴旋流芯对雾化特性的实验研究[J]. 太原理工大学学报,2026,57(5):1001-1007.

XUE Yuning,GAO Guijun,HAN Zhenguo,et al. Atomization characteristics of medical atomizing nozzle with swirl core[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2026,57(5):1001-1007.

医用雾化喷嘴旋流芯对雾化特性的实验研究

薛羽宁[1],高贵军[1],韩振国[2],寇子明[1]

(1. 太原理工大学 矿山流体控制国家地方联合工程实验室,机械与运载工程学院,山西 太原;
2. 山西白求恩医院,山西 太原)

摘 要:**【目的】**为深入研究加压腹腔内气雾化疗中喷嘴旋流芯对雾化特性的影响,以对临床治疗中喷嘴结构参数的选择做出指导。**【方法】**设计正交实验利用激光粒度分析仪和高速摄像机以及激光器对喷雾锥角、液滴Sauter平均直径、颗粒速度等雾化性能参数进行研究,得到旋流芯不同参数对喷嘴雾化特性的影响。**【结果】**结果表明:雾滴粒径主要集中在28~35 μm,槽宽和槽端距是影响雾化特性的主要因素;随着槽端距与中心距的增大,喷雾粒度均呈降低趋势,雾化角则呈上升趋势,随着槽宽逐渐增大,雾滴粒度在中部出现峰值,雾化角减小;喷雾在距离出口2~3 cm处,速度较为稳定,处于9~11 m/s,喷雾速度在雾场中心区域最大,随着雾化锥角的增大,喷雾中部速度越小,且范围也逐渐缩小。

关键词:腹膜化疗;喷嘴;旋流芯;雾化特性;粒径分布

中图分类号:TH69 **文献标识码**:A

DOI:10.16355/j.tyut.1007-9432.20240366 **文章编号**:1007-9432(2026)05-1001-07

Atomization Characteristics of Medical Atomizing Nozzle with Swirl Core

XUE Yuning[1], GAO Guijun[1], HAN Zhenguo[2], KOU Ziming[1]

(1. *National-local Joint Engineering Laboratory of Mining Fluid Control, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*;
2. *Shanxi Bethune Hospital, Taiyuan, Shanxi, China*)

Abstract:**【Purposes】** This work is carried out to deeply study the effects of nozzle swirl core on atomization characteristics in pressurized intraperitoneal aerosol chemotherapy, so order to guide the selection of nozzle structural parameters in clinical treatment. **【Methods】** The orthogonal experiment studies were conducted for gettig the atomization performance parameters such as spray cone angle, droplet Sauter average diameter, and particle velocity, and obtaining the influences of different parameters on the atomization characteristics of the nozzle. **【Results】** The results show that the particle size is mainly between 28 and 35 μm, and the width and the end distance of trough are the main factors affecting the atomization characteristics. With the increase of the distance between the trough end and the center, the spray particle size shows a decreasing trend, while the atomization angle shows an increasing trend. With the gradual increase of the trough width, the particle size of the fog drop appears

收稿日期:2024-05-14;**修回日期**:2024-09-19

基金项目:山西省基础研究项目资助(2012011018-1)

第一作者:薛羽宁,硕士研究生,(E-mail)643981567@qq.com

通信作者:高贵军,博士,教授,硕士生导师,主要从事矿山机械及其自动化、煤矿粉尘治理及喷雾降尘等研究,(E-mail)Gaogj161@163.com

to peak in the middle, and the atomization angle decreases. At 2～3 cm from the outlet, the speed is stable at 9～11 m/s, and the spray speed is largest in the central area of the center of the fog field. With the increase of the atomization cone angle, the middle speed of the spray decreases and the range shrinks.

Keywords: intraperitoneal chemotherapy; nozzle; swirl core; atomization characteristics; particle size distribution

腹膜癌病不仅涉及到癌症的扩散恶化,且与其他转移部位相比,对全身化疗的反应较低,预后差[1-3]。因此,加压腹腔内气雾化疗被认为是治疗腹膜癌变的一种替代选择[4],它利用气体压力的物理性质,以加压气雾剂的形式将化疗剂施加到腹部以增加化疗的肿瘤根除或肿瘤控制的功效[5]。气雾化疗可增加药物覆盖的腹膜表面面积,从而提高组织浓度并降低全身毒性[6-8]。与常规液体腹膜内化疗相比,该方法预期具有更好的空间药物分布模式、更大的组织渗透深度和更高的组织中药物浓度[9,10]。为实现雾化给药的有效性,需要均匀且微小的雾滴。

近年来,世界各地的学者对喷嘴雾化特性开展了一系列研究。石庆宏等人[11]研究了工业化压力式喷雾干燥器的喷嘴流量、喷雾角、雾滴直径与压力的变化关系,以及雾滴粒径和喷嘴径向喷雾通量的分布情况。结果表明雾滴粒径主要集中在80～200 μm。旋转压力式喷嘴的喷雾通量在雾锥中心处最大,随着压力增大,邻近雾锥中心的区域喷雾通量变大,在雾锥边缘处喷雾通量变小。王鹏飞等人[12]分析了工业中不同压力下的煤矿井下喷雾雾化特性,得出工业中煤矿井下喷嘴喷雾压力选用8 MPa较为合理。羡学磊等人[13]研究旋芯雾化喷嘴的雾化特性发现喷嘴在低压下即可实现不大于80 μm粒径的雾化,且粒径分布均匀。Wiebke Solaß等人[14]指出腹腔内药物治疗的两个显著局限是药物分布受限和腹膜结节穿透性差,介绍了一种以机械压力驱动的喷雾装置,由注射器、管路和喷嘴组成,喷嘴直径为0.2 mm,压力约为800 kPa。雾化器通过一个5 mm套管针插入,在腹腔内产生一种气雾剂,是治疗腹膜癌病的一个重要进展。

Lee等人[4]为气雾化疗研发了一个新的模型,包括注射器泵、喷嘴和控制器,其喷嘴雾化平均直径和Sauter平均直径分别为25.4 μm和32.1 μm。Mohammad等人[15]利用计算流体动力学(CFD)建模与实验验证相结合,研究液滴尺寸、液体流速和黏度的影响,结果表明使用目前临床使用的技术(液滴尺寸为30 μm),在液体流速为0.6 mL·s^{-1}时可获得气雾剂的最佳空间分布,以优化腹腔内雾化药物递送。

Chu等人[16]提出了通过调整各设计参数和匹配流量数来优化旋流喷嘴特性的方法。Gad等人[17]研究了孔长径比、旋流室长径比和旋流通道尺寸等参数对喷雾特性的影响。使用高速照相机拍摄喷雾以确定喷雾形状、锥角和喷雾破碎长度。Chen等人[18]研究了长径比、进料槽数、喷射压力和液体黏度对压力旋流雾化器喷雾锥角的影响,得出结论:随着喷射压力的增加锥角也随之增大,而长径比和液体黏度减小了锥角。Rashad等[19]还通过数值研究分析了压力旋流喷嘴的不同几何参数对恒定压降下液膜厚度和喷雾锥角的影响。

综上所述,已有研究成果可为腹腔内雾化药物递送的旋流喷嘴雾化特性的优化提供参考。然而,在低压情况下,针对喷嘴旋流芯结构参数影响喷嘴特性的研究还有所欠缺。因此,本文设计制造了9种不同参数旋流芯,基于喷雾特性分析专用测试实验台系统研究了旋流芯结构参数对喷雾特性的影响,以提高病灶雾化给药的有效性。

1 喷嘴结构及旋流方式

目前,医疗喷嘴常采用压力式旋流喷嘴,压力式旋流喷嘴主要由喷嘴体、旋流芯、芯体压盖三部分组成[20],如图1所示。在喷嘴内部加设旋芯不仅影响喷射距离和喷射压力,同时也影响着流体的雾化效果[21]。当加压液体经过开两个斜切槽的喷嘴旋流芯时,水流沿着斜切方向产生离心效应[22],进行液体整流使得轴向速度衰减更快,雾化锥角更大,雾滴分布更均匀,因此,旋流芯装置起到强化液滴雾化的作用,更有利于医疗雾化应用。旋流芯结构示意图如图2所示,加压液体通过狭小缝隙进入斜切槽加剧水流紊乱[23],促进雾化。旋流芯直径2.3 mm,出口直径1.2 mm,斜切槽角度45°。

2 实验系统与方法

2.1 实验系统

本实验系统主要由喷雾系统和雾化特性测试

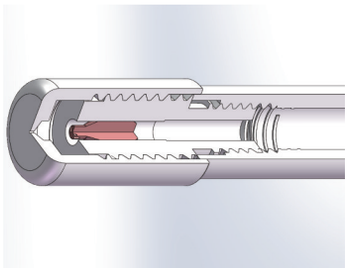


图 1　喷嘴旋流芯结构
Fig. 1　Nozzle swirl core structure

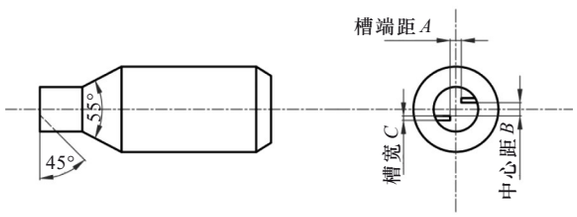
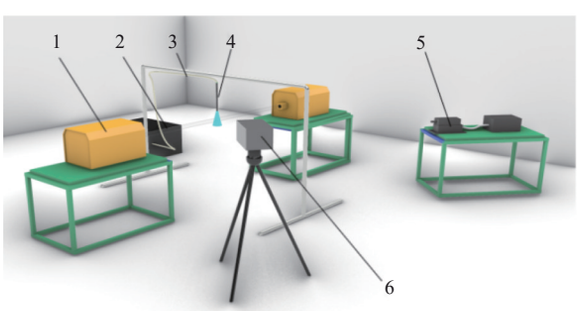


图 2　旋流芯参数
Fig. 2　Swirl core parameters

系统组成。喷雾系统主要由低压旋流微气雾泵、压力表、导管喷嘴组成，雾化特性测试系统主要由 DP-02 激光粒度分析仪、激光器以及 HX-6 高速摄像机、计算机组成。如图 3 所示。



1-激光粒度分析仪；2-低压旋流微气雾泵；3-导管；4-喷嘴；5-激光器；6-高速摄像机
图 3　喷雾粒度分析及测速实验系统
Fig. 3　Experiment system for spray particle size analysis and speed measurement

实验测量系统装置周围防止水雾喷溅搭建塑料帷布，已确保实验安全，并避免可能导致错误的气流[24]。目前，光学测量技术最适合测量水雾特性，因此，本次研究采用 OMEC DP-02 粒径分析仪对喷雾雾滴粒径分布进行测量，统一测量距离为距喷嘴孔 6 cm 处。以纯净水为工作介质，利用低压旋流微气雾泵加至预设压力，连接管路，使之通过导管喷嘴形成喷雾喷出。低压旋流微气雾泵上装设压力表，用于检测气雾泵加压维持在预设值。在相同低压（1.8 MPa）下进行实验。实验运用背光直拍方法拍摄，高速摄像机拍摄帧率为 8 000 张/s，喷嘴孔径为 0.2 mm，雾流形状为实心圆锥，实验现场如图 4 所示。

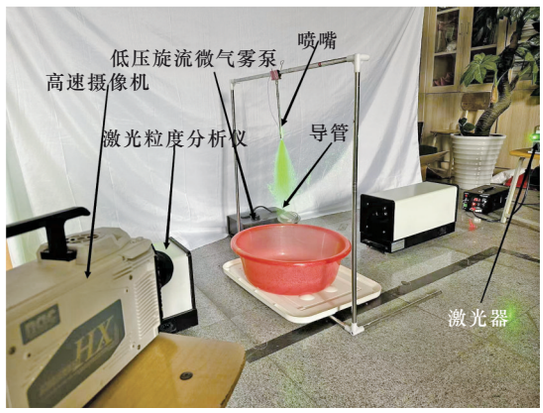


图 4　喷雾测试实验现场图
Fig. 4　Field photo of spray test experiment

2.2　实验方案

本实验以不同结构参数下的旋流芯为研究对象，基于旋流芯三个主要参数：槽端距 A、中心距 B 和槽宽 C 进行三因素三水平正交实验分析，正交实验因素水平在表 1 中列出，选取正交表 $L_9(3^4)$，进行 9 次实验，分析各个因素对实验指标的影响。所设计的正交实验方案如表 2 所示。

表 1　正交实验因素水平表
Table 1　Orthogonal experimental factors

水平	因素		
	槽端距/mm	中心距/mm	槽宽/mm
1	−0.2	0.36	0.12
2	0	0.48	0.15
3	0.2	0.64	0.21

表 2　正交实验方案
Table 2　Orthogonal experimental protocol

实验号	因素		
	槽端距/mm	中心距/mm	槽宽/mm
1	−0.2	0.36	0.12
2	−0.2	0.48	0.15
3	−0.2	0.64	0.21
4	0	0.36	0.15
5	0	0.48	0.21
6	0	0.64	0.12
7	0.2	0.36	0.21
8	0.2	0.48	0.12
9	0.2	0.64	0.15

根据正交实验方案，进行雾滴粒径的空间分布实验；利用激光器在流场中撒布合适的示踪粒子，并利用高速摄像机捕捉图像进行雾化锥角的测定；同时通过图像捕捉装置利用帧捕集器和分析显示软件捕捉流场信息，获得流动的瞬时平面速度场。

由于旋流芯尺寸过小，为分析与区分旋流芯实验参数，在实验室内搭建基于视觉的旋流芯微观测量实验台，如图5所示。显微镜放大倍数为4倍，观测图像如图6所示。

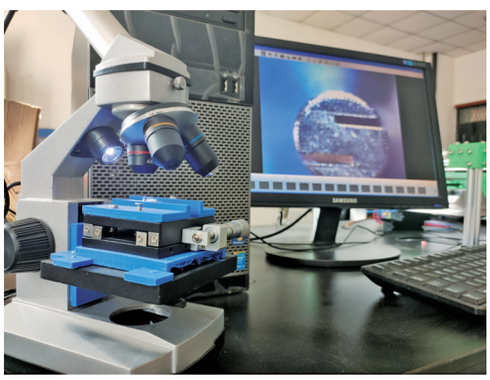


图5 可视化旋流芯微观测量装置

Fig. 5 Visual swirl core microscopic measuring device

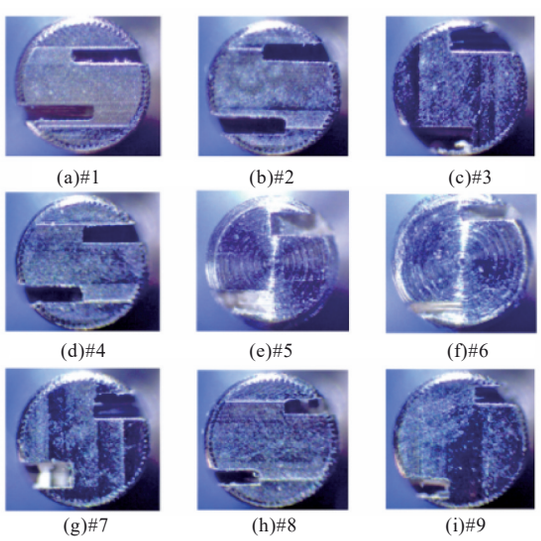


图6 旋流芯观测图像

Fig. 6 Swirl core observation images

3 结果与讨论

3.1 旋流芯参数与粒度的关系

表3为不同因素关于粒度指标的正交实验表。可见，雾滴粒径主要集中于28～35 μm，其雾滴粒径越小，液滴雾化效果越好，雾化给药性越佳。其中，槽宽极差最大，表明此因素水平对实验指标影响最显著，为主要考虑的因素。当以粒度为指标时，各因素对实验指标的影响按大小次序为槽宽＞槽端距＞中心距。

图7是各因素对粒径的影响变化曲线，图7显示：对于旋流芯槽端距参数的增加，雾滴索太尔平均粒径$D[3,2]$呈现下降趋势，这表明，槽端距的增大有利于液滴破碎；中心距对液体雾化有显著的积极影响，中心距的增大使雾粒有较大幅度的减少；在0.15 mm的基础上减小或增大槽宽都会使喷嘴雾化性能升高，适当减小槽宽或增大槽宽，有助于提高喷嘴的雾化能力。

表3 正交实验表-考察指标粒度

Table 3 Orthogonal experimental results with granularity as the evaluation index

试验号	因素			考察指标
	1 A/mm	2 B/mm	3 C/mm	粒度/μm
1	−0.2	0.36	0.12	31.65
2	−0.2	0.48	0.15	35.98
3	−0.2	0.64	0.21	33.52
4	0	0.36	0.15	34.57
5	0	0.48	0.21	28.94
6	0	0.64	0.12	30.15
7	0.2	0.36	0.21	30.96
8	0.2	0.48	0.12	30.85
9	0.2	0.64	0.15	30.95
K_1	101.15	97.18	92.65	各因素水平指标求和
K_2	93.66	95.77	101.50	
K_3	92.76	94.62	93.42	
$k_1=K_1/3$	33.717	32.393	30.883	各因素水平指标和平均值
$k_2=K_2/3$	31.220	31.923	33.833	
$k_3=K_3/3$	30.920	31.540	31.140	
极差	2.797	0.853	2.950	正交表所出现的较优方案
较优水平	$A3$	$B3$	$C1$	

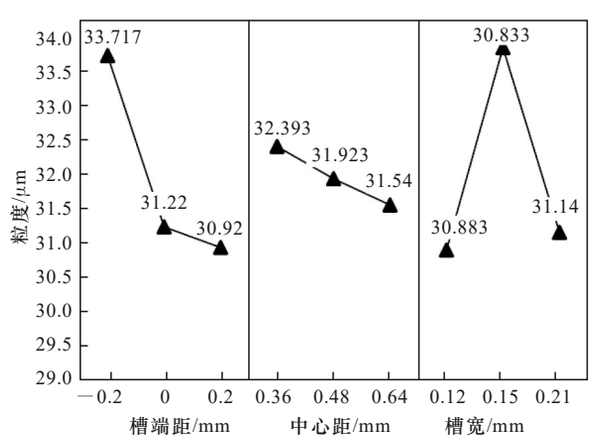


图7 各因素对粒径的影响

Fig. 7 Effect of each factor on particle size

3.2 旋流芯参数与雾化角之间的关系

图8是喷雾雾化出口处各实验条件下的雾化角，可见，雾化角分布范围为40°～60°。其覆盖面积越大，用于医疗中就具有更好的空间药物分布模式。由不同因素关于喷雾锥角指标的正交实验表表4可知，槽端距对雾化角有显著影响，槽宽对雾化角的影响次之，而中心距对雾化角影响较小。

表 4　正交实验表-考察指标喷雾锥角

Table 4　Orthogonal experimental results with spray cone angle as the evaluation index

试验号	因素			考察指标
	1 A/mm	2 B/mm	3 C/mm	雾化角/(°)
1	−0.2	0.36	0.12	49.20
2	−0.2	0.48	0.15	44.33
3	−0.2	0.64	0.21	40.29
4	0	0.36	0.15	48.79
5	0	0.48	0.21	48.84
6	0	0.64	0.12	58.24
7	0.2	0.36	0.21	49.09
8	0.2	0.48	0.12	58.94
9	0.2	0.64	0.15	60.57
K_1	133.82	147.08	166.38	各因素水平指标求和
K_2	155.87	152.11	153.69	
K_3	168.60	159.10	138.22	
$k_1=K_1/3$	44.61	49.03	55.46	各因素水平指标和平均值
$k_2=K_2/3$	51.96	50.70	51.23	
$k_3=K_3/3$	56.20	53.03	46.07	
极差	11.59	4.00	9.39	正交表所出现的较优方案
优方案	$A3$	$B3$	$C1$	

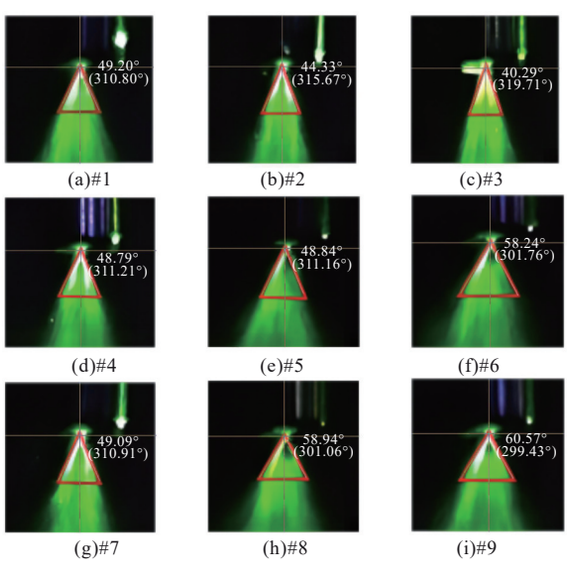


图 8　喷雾锥角

Fig. 8　Spray cone angles

图 9 是各因素对雾化锥角的关系曲线图，雾化角随着槽端距增大而不断增大；中心距对雾化锥角无显著影响，随中心距逐渐增大雾化锥角缓慢增大，趋势平缓；随着槽宽的增大，雾化锥角显著降低，适当减小槽宽，有助于提高喷嘴的雾化性能。

3.3　旋流芯参数与喷雾速度之间的关系

图 10 是不同实验下的雾场速度分布图，显示了

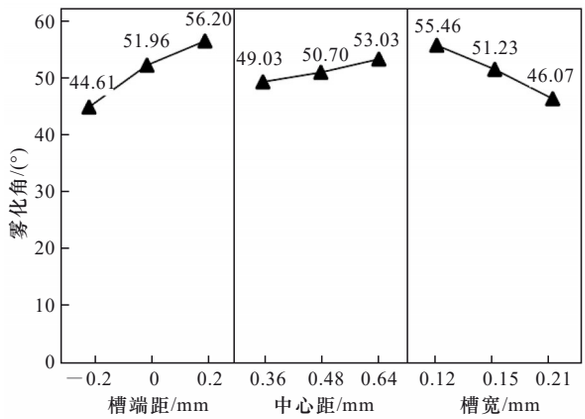


图 9　各因素对雾化角的影响

Fig. 9　Influence of each factor on atomization angle

不同旋流芯参数下喷嘴雾化时速度的流场分布，结果表明：在距喷嘴 2～3 cm 范围处，喷雾速度约为 9～11 m/s。雾场中随着轴向距离的增加，扩散区域也越来越大，且喷雾速度在雾锥中心处最大，在雾锥边缘处变小。雾场中随着径向距离的增加，邻近雾锥中心的区域速度越大，在雾锥边缘处喷雾速度变小。联合图 8 与图 10 可知，喷雾锥角越大，雾场中喷雾速度越小且越分散。

4　结论

采用激光衍射散射法及 PIV 图像测速技术，对医用雾化喷嘴中旋流芯结构参数对喷雾特性的影响进行了实验研究，得出以下结论：

1）对于该旋流喷嘴，槽宽、槽端距是影响喷嘴雾化能力的主要因素，其中，槽宽对喷雾雾滴粒度影响显著，槽端距对雾化锥角影响较大；中心距对二者均影响最小。

2）较优化的喷嘴旋流芯几何参数应为槽端距 0.2 mm、中心距 0.64 mm、槽宽 0.12 mm；随着槽端距增大，雾滴粒径逐渐减小，雾化角逐渐增大，所能达到的空间药物分布增大，治疗效果越佳。

3）在距喷嘴 2～3 cm 范围处，喷雾速度约为 9～11 m/s；在距离喷嘴约 6 cm 处，喷雾速度约为 7～8 m/s。雾场中随着轴向与径向距离的增加，雾场区域逐渐变大，且喷雾速度在雾锥中心区域最大，在雾锥边缘处速度变小。

目前我国对医疗中的低压旋流喷嘴的研究还处于初级阶段，仍需大量前瞻性研究和对照实验的结果来探索验证，此后对于喷嘴孔直径、喷嘴长径比等参数对雾化特性的影响以及后续仿真实验还有待进一步研究。

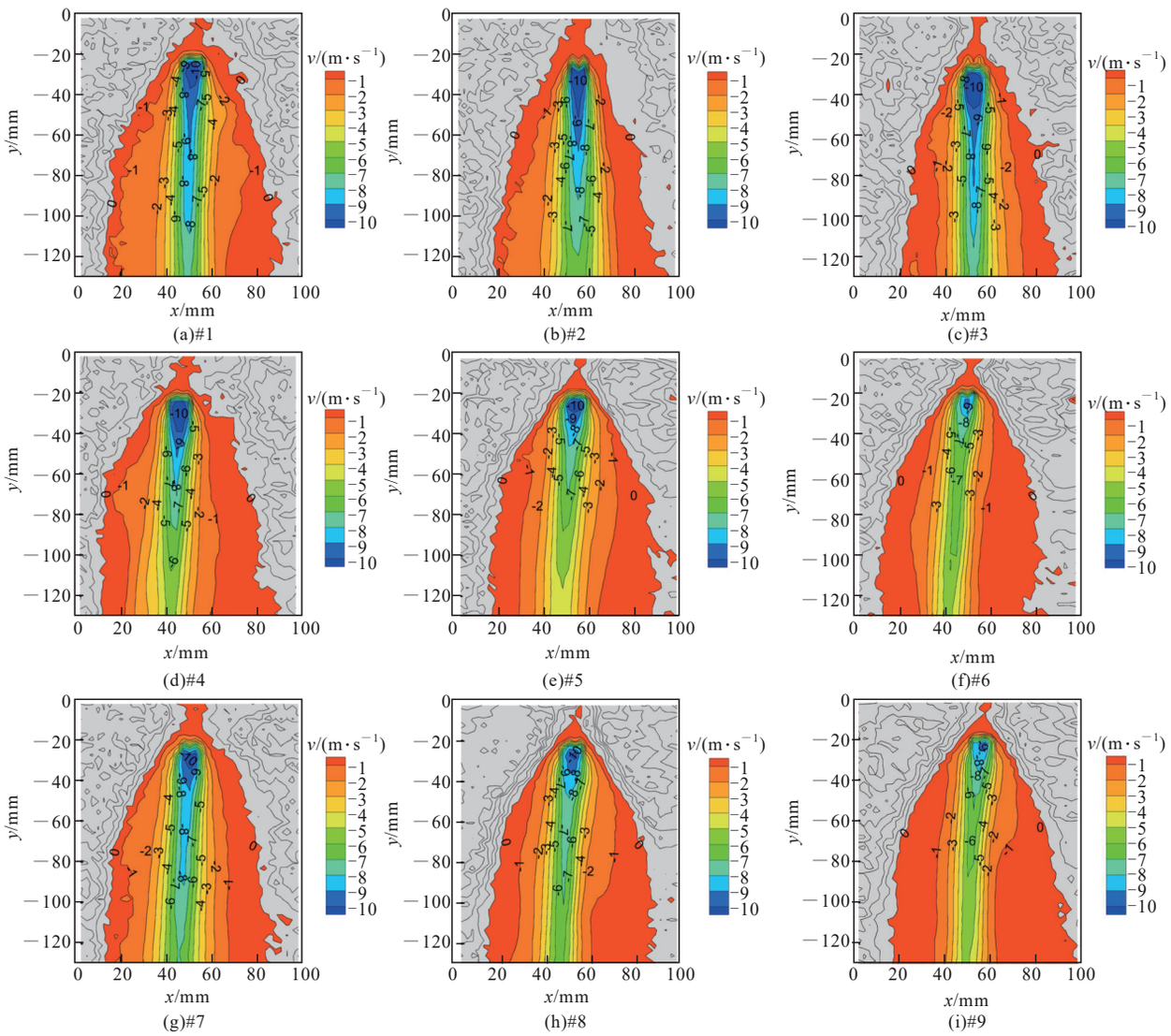


图 10　雾场速度分布

Fig. 10　Fog field velocity distributions

参考文献：

[1] Franko J, Shi Q, Meyers J P, et al. Prognosis of patients with peritoneal metastatic colorectal cancer given systemic therapy: An analysis of individual patient data from prospective randomised trials from the Analysis and Research in Cancers of the Digestive System (ARCAD) database[J]. The Lancet Oncology, 2016, 17: 1709-1719.

[2] Dedrick R L, Flessner M F. Pharmacokinetic problems in peritoneal drug administration: Tissue penetration and surface exposure [J]. Journal of the National Cancer Institute, 1997, 89: 480-487.

[3] Markman M. Intraperitoneal antineoplastic drug delivery: Rationale and results[J]. The Lancet Oncology, 2003, 4(5): 277-283.

[4] Lee H S, Kim J, Lee E J, et al. Evaluation of a novel prototype for pressurized intraperitoneal aerosol chemotherapy[J]. Cancers, 2020, 12(3): 633-643.

[5] Tempfer C B. Pressurized intraperitoneal aerosol chemotherapy as an innovative approach to treat peritoneal carcinomatosis[J]. Medical Hypotheses, 2015, 85(4): 480-484.

[6] Armstrong D K, Bundy B, Wenzel L, et al. Intraperitoneal cisplatin and paclitaxel in ovarian cancer[J]. The New England Journal of Medicine, 2006, 354: 34-43.

[7] Glehen O, Mohamed F, Gilly F N. Peritoneal carcinomatosis from digestive tract cancer: New management by cytoreductive surgery and intraperitoneal chemohyperthermia[J]. The Lancet Oncology, 2004, 5(4): 219-228.

[8] Glehen O, Cotte E, Schreiber V, et al. Intraperitoneal chemohyperthermia and attempted cytoreductive surgery in patients with peritoneal carcinomatosis of colorectal origin[J]. British Journal of Surgery, 2004, 91: 747-754.

[9] Solaß W, Hetzel A, Nadiradze G, et al. Description of a novel approach for intraperitoneal drug delivery and the related device[J].

Surgical Endoscopy，2012，26(7)：1849-1855.

[10] Solaß W，Kerb R，Mürdter T，et al.Intraperitoneal chemotherapy of peritoneal carcinomatosis using pressurized aerosol as an alternative to liquid solution：First evidence for efficacy[J].Annals of Surgical Oncology，2014，21(2)：553-559.

[11] 石庆宏，叶世超，张登平，等.旋转压力式喷嘴喷雾特性的实验研究[J].高校化学工程学报，2005(6)：851-854.

[12] 王鹏飞，刘荣华，汤梦，等.煤矿井下高压喷雾雾化特性及其降尘效果实验研究[J].煤炭学报，2015，40(9)：2124-2130.

[13] 羡学磊，马建琴，董海斌，等.旋芯雾化喷嘴仿真与实验研究[J].消防科学与技术，2020，39(12)：1709-1712.

[14] Solass W，Urs G P，Zieren J，et al.Pressurized intraperitoneal aerosol chemotherapy(PIPAC)：Occupational health and safety aspects[J].Annals of Surgical Oncology，2013，20(11)：3504-3511.

[15] Mohammad R G，Debbaut C，Ghorbaniasl G，et al.Optimization of intraperitoneal aerosolized drug delivery using computational fluid dynamics (CFD) modeling[J].Scientific Reports，2022，12(1)：6305.

[16] Chu C C，Chou S F，Lin H I，et al.Theoretical analysis of heat and mass transfer in swirl atomizers[J].Heat and Mass Transfer，2006，43：1213-1224.

[17] Gad H M，Baraya E A，Farag T M，et al.Effect of geometric parameters on spray characteristics of air assisted pressure swirl atomizer[J].Alexandria Engineering Journal，2022，61：5557-5571.

[18] Chen S K，Lefebvre A H，Rollbuhler J.Factors influencing the effective spray cone angle of pressure-swirl atomizers[J].Journal of Engineering for Gas Turbines and Power，1992，114：97-103.

[19] Rashad M，Huang Y，Zheng Z K.Effect of geometric parameters on spray characteristics of pressure swirl atomizers[J].International Journal of Hydrogen Energy，2016，41(35)：15790-15799.

[20] 聂涛，高贵军.压力旋流喷嘴雾化特性的实验研究[J].科学技术与工程，2016，16(7)：162-164.

[21] 刘洋，杨红，高志远，等.旋芯雾化喷嘴流场特性的数值模拟[J].装备制造技术，2015(1)：131-132.

[22] 赵金国，何伟.具有旋芯的高效雾化喷嘴仿真和实验研究[J].机械设计与制造，2017(3)：137-140.

[23] 张泽鹏，潘越，杨帆，等.基于CFD的纵向旋流喷嘴参数优化[J].煤矿安全，2021，52(2)：131-134.

[24] Gao G J，Wang C J，Kou Z M.Experimental studies on the spraying pattern of a swirl nozzle for coal dust control[J].Applied Sciences，2018，8(10)：1770-1784.

（编辑：杨　鹏）