



# 气动无针注射器喷嘴射流的数值模拟

刘 仪, 姜克建

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘要:** 为研究兽用气动无针注射器的喷嘴结构对射流形态、轴向喷射速度和动压的影响, 利用计算流体力学工具对淹没和非淹没两种实验工况下的高压射流进行数值模拟。在淹没环境中, 采用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型, 对平顶型、锥型和锥直型三种典型喷嘴的射流流场特性进行分析; 在非淹没环境中, 采用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型和 VOF 模型, 对不同几何参数锥直型喷嘴的射流流场进行模拟分析。结果表明: 在淹没环境中, 锥直型喷嘴能够得到可控性较好且速度更高的射流; 在非淹没环境中, 当喷嘴直径为 0.25 mm、收缩段长度为 5 mm 时, 随着收缩角的增大, 射流轴向速度先增大后减小, 并在收缩角为  $30^\circ$  时达到最大值; 长径比为 3 的圆柱段能够较好聚集加速射流; 入口压力为 31 MPa 的锥直型喷嘴产生的射流滞止压强能够满足兽用无针注射的要求, 其滞止压强最大值位于以喷嘴中心轴线为圆心, 半径 0.06~0.07 mm 的圆周内。该研究对无针注射器微型喷嘴的性能评估和优化设计有一定的参考意义。

**关键词:** 无针注射; 高压水射流; 淹没射流; 非淹没射流; 喷嘴结构; 数值模拟

**中图分类号:** TH137; TH16

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2022) 05-0389-08

## Numerical simulation of the jet flow from pneumatic needle-free injector nozzle

LIU Yi, JIANG Kejian

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang  
Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of the nozzle structure of pneumatic needle-free injector on the jet flow shape, axial jet velocity and dynamic pressure, the numerical simulation was performed on high pressure jet under submerged experimental condition and non-submerged experimental condition using computational fluid dynamics tools. In the submerged environment, the jet flow field characteristics of three typical nozzles (the flat-top, conical and cone-straight type) were analyzed using Standard  $k-\epsilon$  turbulence model. In the non-submerged environment, the numerical simulation was performed on the jet flow field of cone-straight type nozzle with different geometrical parameters using  $k-\epsilon$  turbulence model and VOF model. The results show that the cone-straight nozzle can obtain a better controllable and higher velocity jet in the submerged environment. In the non-submerged environment, when the diameter of the nozzle is 0.25 mm and the length of the contraction section is 5 mm, the axial velocity of the jet increases first and then decreases with the increase of the contraction angle, and it reaches the maximum value when the contraction angle is  $30^\circ$ ; the cylindrical section with length-width ratio of 3 can better gather the accelerating jet; the jet flow stagnation pressure generated by the cone-straight nozzle with an inlet pressure of 31 MPa can meet the requirements of the needle-free injection for veterinary use. The

maximum stagnation pressure of the jet is located within a circle with the nozzle central axis as the center and a radius of 0.06~0.07 mm. The research results have a certain reference value for the performance evaluation and optimization design of the needle-free injector micro-nozzle.

**Key words:** needle-free injection; high pressure water jet; submerged jet; non-submerged jet; nozzle structure; numerical simulation

## 0 引言

在目前畜牧防疫中,我国多地仍采用传统有针注射方式对畜禽进行接种,但该注射方式存在操作繁琐、注射后废弃物处理困难、易交叉感染等缺点<sup>[1]</sup>。与传统有针注射方式相比,无针注射的优势在于:注射时对神经末梢刺激小,产生疼痛感较小;药物在皮下组织呈扩散状,吸收更好;操作简便、效率高、适用于大规模畜牧注射;注射头更换频率低,降低交叉感染风险<sup>[2]</sup>。典型兽用无针注射器的工作原理是:在注射器启动后,安瓿传送的药液经过喷嘴,由高压低速状态转化为低压高速状态,穿透皮肤完成给药<sup>[3]</sup>。喷嘴作为无针注射器的关键部件,其几何结构参数对射流的流场特性及注射效果会产生直接影响。收缩型喷嘴广泛应用于金属切割、矿山开采及清洗等场景中,已有学者对射流流动特性与喷嘴结构优化进行了大量研究<sup>[4-6]</sup>,以增强射流冲击力、降低射流能耗、减轻冲击破坏。但目前未有文献对兽用气动无针注射器喷嘴射流进行全面系统的研究,喷嘴结构是影响射流形态、轴向喷射速度和动压的重要因素,因此优化兽用气动无针注射器的喷嘴结构,改善其射流流场特性,从而提高兽用无针注射器的注射性能。

计算流体力学的发展,对喷嘴射流的流场机理研究起到极大的促进作用。在水射流流场特性研究方面,Guha等<sup>[7]</sup>使用FLUENT软件对高压水射流压力特性进行了数值模拟,数值模拟结果与现有实验结果具有良好的吻合性,研究表明,射流滞止压力沿轴线方向衰减;张阳<sup>[8]</sup>采用多相流模型,针对锥直型喷嘴的非淹没射流流场进行模拟,结果发现射流的速度最大值并不是在轴线上,而是分布在轴心半径方向上的某一圆周上。在喷嘴形状研究方面,杨友胜等<sup>[9]</sup>对平顶型、锥型、余弦型三种喷嘴的流量特性进行实验研究,发现喷嘴的几何特征参数对水射流的能量损失有很大影响,且喷嘴内壁轮廓越接近于流线型,射流的能量损失越小;张铁民等<sup>[10]</sup>对多种形状的压电式无针注射器喷嘴,采用VOF多相流模型对喷嘴出口速度、喷嘴出口湍流强

度和喷嘴出口压力进行数值模拟分析,发现锥直型喷嘴可得到最佳射流特性,其射流具有较强可控性;刘文杰等<sup>[11]</sup>采用了FLUENT软件对三种形状喷嘴的高压水射流进行数值模拟,结果表明锥型和锥直型喷嘴产生的最大射流速度和最大压力均明显大于平顶型喷嘴。在喷嘴几何参数研究方面,何茵楠等<sup>[12]</sup>针对高压手术水刀进行数值模拟,对比不同喷嘴结构的模拟结果,发现锥直型喷嘴结构能量转化率最高,当锥角为 $30^\circ$ 时,射流动压最稳定;Shen等<sup>[13]</sup>以收敛性喷嘴作为研究对象,基于田口法的正交原理,对影响喷嘴射流速度的喷嘴参数进行实验研究,并通过有限元分析软件ANSYS模拟喷嘴内射流流动,最终确定收缩角和出口直径这两个喷嘴几何因素能够显著影响射流速度;李震等<sup>[14]</sup>采用二维轴对称模型进行建模与仿真,通过单因素控制法对喷嘴射流进行数值模拟,结果发现喷嘴的收缩角、长径比、收缩段长度以及喷嘴直径均能够对射流流场产生重要影响。在注射效果方面,陈波等<sup>[15]</sup>采用CFD方法对无针注射器射流注射的全过程进行模拟,得出不同速度的射流在皮下穿透扩散的结果,与实验结果较好吻合;马兴江<sup>[16]</sup>对不同滞止压强的无针注射器进行实验分析,发现当滞止压强达到24 MPa时,药液能够达到皮下,但不能进入肌肉层,当滞止压强达到32 MPa时,药液能够进入肌肉层,且注射深度随着滞止压强增大而加深。综上所述,无针注射器注射效果与喷嘴结构及其几何参数有关。

本文以兽用无针注射器微型喷嘴作为研究对象,其直径为0.1~0.3 mm,喷射压强为15~50 MPa,与现有应用于破碎和切割工作的喷嘴有显著不同。为研究无针注射器微型喷嘴的几何参数对其射流场的特定影响,本文应用计算流体力学软件FLUENT,结合Standard  $k-\epsilon$ 模型和多相流VOF模型,分析喷嘴形状及几何参数对高压射流的射流形态、速度和动压分布的影响,以期对无针注射器微型喷嘴的优化设计和加工制造提供一定的参考。

## 1 喷嘴结构及其高压水射流流动特性

### 1.1 喷嘴结构

在气动式无针注射器的设计中,喷嘴的结构参数选择尤为重要。本文设计的无针注射器主要实现幼年家猪的疫苗注射功能,需水流能量较为集中,冲击作用明显。不同结构的喷嘴会得到不同的水束状态,产生不同的射流效果。根据高压射流喷嘴的相关资料<sup>[17]</sup>,目前喷嘴结构主要有平顶型喷嘴、锥型喷嘴和锥直型喷嘴,其结构示意图如图1所示,其中: $D$ 为喷嘴入口直径, $L$ 为喷嘴收缩段长度, $l$ 为喷嘴圆柱段长度, $d$ 为喷嘴出口直径, $\alpha$ 为喷嘴收缩角。

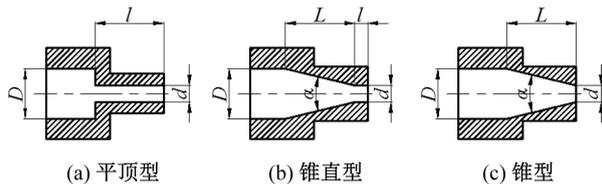


图1 三种喷嘴模型结构示意图

为获得最适应于无针注射的喷嘴结构参数,对比图1中的三种喷嘴数值模拟结果,表1给出喷嘴原始数据。

表1 三种喷嘴模型的几何参数

喷嘴类型	喷嘴出口直径 $d/\text{mm}$	收缩角 $\alpha/(\text{°})$	喷嘴收缩段长度 $L/\text{mm}$	喷嘴圆柱段长度 $l/\text{mm}$
平顶型喷嘴	0.25	—	—	5.0
锥型喷嘴	0.25	13	5.0	—
锥直型喷嘴	0.25	13	5.0	5.0

### 1.2 高压水射流流动特性

图2为高压水射流流动特性示意图。射流以初始速度  $u_0$  自喷嘴射出,与周围介质形成速度不稳定的间断面,卷吸周围介质,随着卷吸介质的增多,射流逐渐扩散,阻力也随之增大,经过一段距离的发展后,射流的全断面上均成紊流,射流边缘处速度较低,中心处速度仍保持初始速度。

射流的核心段为喷嘴出口处至呈锥形的核心区

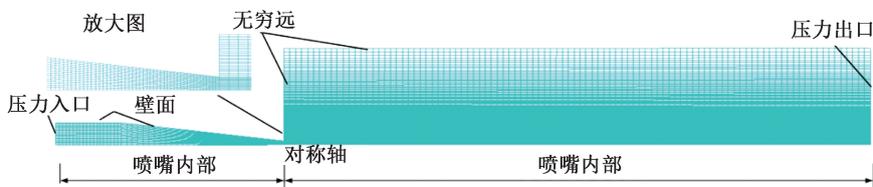


图3 锥型喷嘴内外流场网格结构示意图

#### 2.1.2 网格无关性验证

本文分别对网格数为 25134、71073、133143 的算例进行模拟对比分析,来验证网格的无关性。当

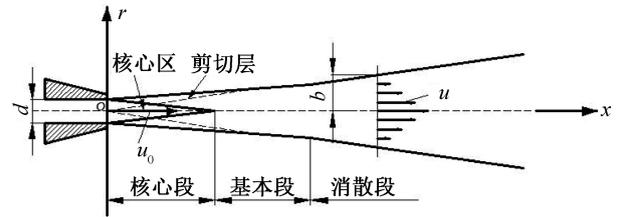


图2 高压水射流流动特性示意图<sup>[18]</sup>

末端,该区域射流能量最大,同一截面处速度相同,也是无针注射最佳区域<sup>[19]</sup>。射流的消散段是紊流在介质环境中充分发展的部分,在工业中常用于清洗作业。基本段位于核心段和消散段中间的区域,流场情况较复杂,一般在模拟计算中不分析。

## 2 数值模拟

本文采用流体仿真软件 FLUENT,应用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型,对三种结构喷嘴产生的淹没射流流场进行仿真分析;应用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型和 VOF 模型,对不同几何参数的锥直型喷嘴产生的非淹没射流流场进行模拟分析。

### 2.1 流场分析方法

#### 2.1.1 模型建立

用网格划分软件 ICEM 分别建立三种喷嘴的二维模型,由于射流流场有很好的对称特性,ICEM 建模采用二维轴对称模型。由于三种喷嘴有限元网格结构类似,本文只展示锥型喷嘴网格。图3为锥型喷嘴内外流场网格结构图,采用方形结构网格对喷嘴内部及外流场进行划分,并在喷嘴内部和喷嘴外部中心轴线部分进行网格加密,左侧为喷嘴内部区域,右侧为射流喷出喷嘴后的外部区域,外部流场的基本尺寸为  $18\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。其中入口设置为压力入口,大小为  $30\text{ MPa}$ ;压力出口为标准大气压;喷嘴壁面边界均设置为无滑移壁面,采用非耦合隐式进行求解,二阶迎风格式,其他保持默认设置。本文主要研究喷嘴的轴向速度、轴向动压和流场特性,因而忽略注射目标对射流的影响,对不同结构的喷嘴高压自由射流进行模拟。

流场计算达到收敛时,得到三种网格在收敛条件下中心轴线速度随轴线位置变化的数据。网格无关性验证如图4所示,从图中可以得出:当网格数为

71073 与 133143 时,轴线速度相差较小;当网格数为 25134 时,轴线速度在喷嘴处有明显差距,速度趋势也不相同,因此排除网格数为 25134 的算例。本文在保证计算准确性的前提下节约时间成本,选择网格数目为 71073 的网格模型开展数值模拟。

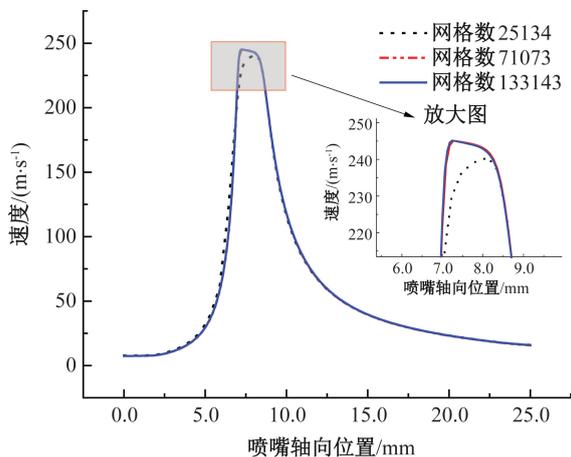


图4 不同网格数的锥型喷嘴淹没射流轴向速度曲线

## 2.2 喷嘴射流流动的数学模型

根据无针注射器喷嘴的结构特点,本文主要研究淹没及非淹没环境下的喷嘴射流流场的变化过程。

本文使用 N-S 方程作为控制方程,由于高压自由射流在经过喷嘴时呈现高速湍流状态,因此使用 Standard  $k-\epsilon$  模型为湍流计算模型<sup>[7]</sup>。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

其中: $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $x_i$  为射流在  $i$  方向的坐标,  $\text{m}$ ;  $u_i$  为速度矢量在  $i$  方向上的分量,  $\text{m}/\text{s}$ 。

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \right\} + S_i \quad (2)$$

其中: $k$  为湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $p$  为流体静压,  $\text{Pa}$ ;  $x_j$  为射流在  $j$  方向的坐标,  $\text{m}$ ; 当  $i=j$  时,  $\delta_{ij}=1$ , 当  $i \neq j$  时,  $\delta_{ij}=0$ 。

$k$  方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_j}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_K \quad (3)$$

$\epsilon$  方程:

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_j}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_{3\epsilon} G_b) - G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4)$$

其中: $G_k$ 、 $G_b$  分别表示由平均速度梯度和浮力引起的湍流能  $k$  的产生项; $Y_M$  为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$  为常数,分别为 1.44、1.92、0.09;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\epsilon$  分别是湍动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$  对应的普朗特数,分别为 1.0 和 1.3;  $S_k$  和  $S_\epsilon$  是用户定义的源项;湍流黏性系数  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 。

式(1)–(4)中所涉及的物理量在淹没射流的计算中是单相流体(水)的物理参数和变量。在非淹没射流的情况下,每相流体都遵循控制方程(1)–(4)描述的流动规律,同时在方程中需考虑液态水与环境空气的相互作用。为简化多相流的计算,本文采用了工程上普通应用的 VOF 多相流模型。

VOF 模型中不同的流体组分共用一套动量方程,通过计算流体体积分数  $\alpha$ ,追踪各流体组分的流量,从而构造自由面形状。

$$\frac{\partial (\rho \alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \alpha) = 0 \quad (5)$$

$$\sum \alpha_q = 1 \quad (6)$$

其中:当  $\alpha_q=0$  时,单元内不含第  $q$  相流体;当  $\alpha_q=1$  时,单元内只含第  $q$  相流体;当  $0 < \alpha_q < 1$  时,单元内同时含第  $q$  相流体和其他多相流。式(5)、(6)只针对非淹没射流。

在 VOF 模型中,液相水视为不可压缩介质,气相采用可压缩理想气体介质。

## 3 模拟结果及分析

本文首先对锥型喷嘴的淹没射流和非淹没射流进行模拟,将模拟结果与喷嘴结构的高压射流特性理论进行比较。然后对三种喷嘴的淹没射流流场进行模拟分析,得出最优形状喷嘴,对锥直型喷嘴产生的非淹没射流做进一步的模拟分析,通过改变其收缩角与长径比,确定最佳几何参数。最后,结合上文所得出的最优喷嘴数据,对不同入口压力的射流进行模拟,参照实验结果,得出能够满足兽用无针注射的初始入口条件。

### 3.1 锥型喷嘴淹没射流与非淹没射流对比分析

在淹没环境下,射流介质与周围环境介质相同,环境介质对射流的摩擦阻力大,射流的能量消耗迅速,速度变化大,射流分层明显,核心区较短;在非淹

没环境下,射流介质与周围环境介质不同,如水射到空气中,空气对水的阻力较小,射流能量损失小,速度变化小,射流分层不明显,核心区较长。图 5 为锥型喷嘴的淹没射流与非淹没射流的速度云图,可以发现:淹没射流比非淹没射流的轴线速度下降趋势更明显,等核区更短,模拟结果与理论分析结果相吻合。

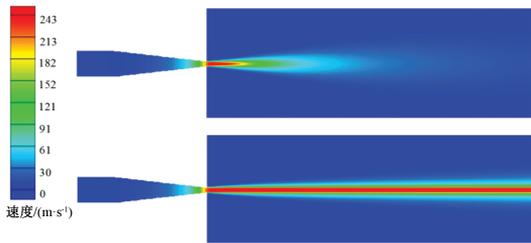


图 5 锥型喷嘴的淹没射流与非淹没射流的速度云图

图 6 和图 7 分别为锥型喷嘴的淹没射流与非淹没射流在距离压力入口 7.5~9.0 mm 处速度随径向位置的变化图。综合图 6 和图 7 可以看出:射流距离喷嘴越近,在径向方向上速度变化越明显;淹没射流的径向速度变化量要远大于非淹没射流。这是因为离喷嘴较近的射流速度较大,与外界介质相互作用明显,能量损失大,介质水相比于空气,会造成更大的能量损失。因此,淹没射流的径向速度变化量更大。

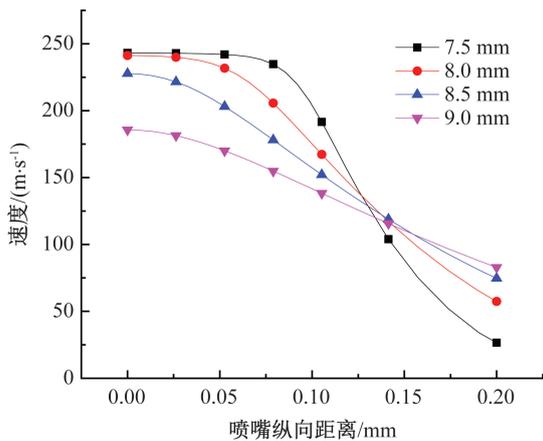


图 6 锥型喷嘴淹没射流径向速度变化曲线

### 3.2 三种喷嘴在淹没环境条件下的对比

本文在淹没环境下对三种喷嘴进行数值模拟。图 8 和图 9 分别为三种喷嘴的速度等值线云图和动压等值线云图。通过不同形状喷嘴的速度及动压云图对比可以发现,喷嘴形状不同,产生射流的流场特性不同,其速度和动压等值线分布也不同。喷嘴在收缩段聚集加速射流,射流在离开喷嘴后,形成较明显的核心区,而射流的动压与速度随着喷射距离的增长迅速减小。喷嘴形状不同,淹没射流的速度及动压等值线分布也不同。综合比较三种喷嘴射流,锥直型喷嘴的射流流场特性最好。对比锥型喷嘴和

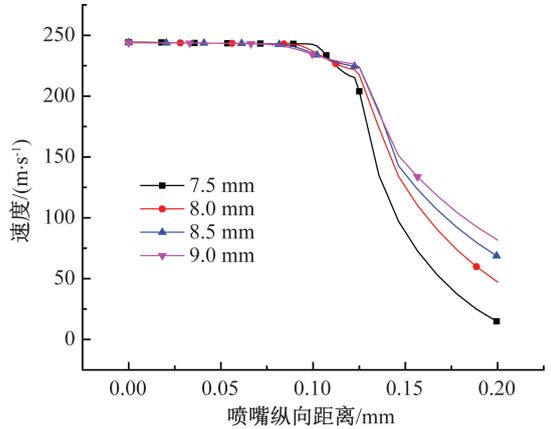


图 7 锥型喷嘴非淹没射流径向速度变化曲线

锥直型喷嘴可以发现,喷嘴的圆柱段对射流流场产生一定的影响,锥直型喷嘴产生的射流速度及动压流场特性略好于锥型喷嘴,其射流核心区长度略长。对比平顶型喷嘴和锥型喷嘴可以看出,喷嘴收缩段的收缩角对射流流场产生较大的影响。有收缩角的锥型喷嘴产生的射流速度与动压流场特性均明显好于平顶型喷嘴,并且平顶型喷嘴的射流核心区全部位于喷嘴内部,在实际应用中,喷嘴内壁对射流造成很大的能量损失,给喷嘴带来冲击、振动及磨损,减少使用寿命。图 10 为三种喷嘴轴线速度对比图,从图中可以看出,在喷嘴出口处,锥型喷嘴的水流速度增量远大于锥直型喷嘴,导致射流对喷嘴的冲击振动较大,不利于稳定注射。综合比较后,本文认为具有收缩角和圆柱段的锥直型喷嘴更加符合无针注射的要求。

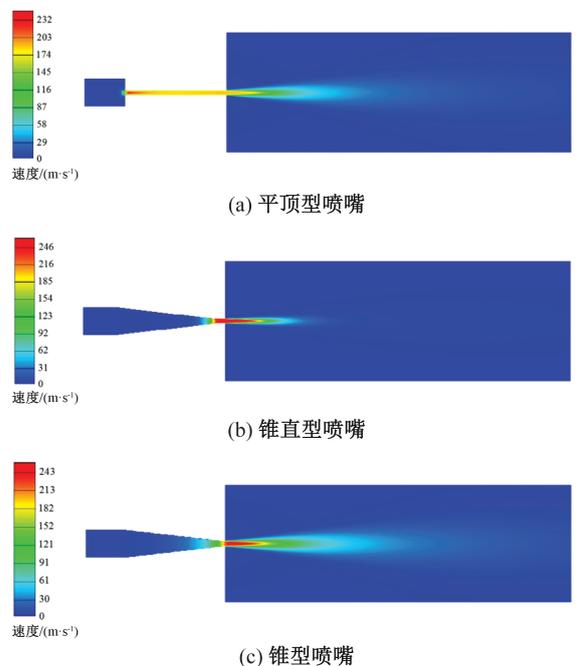


图 8 三种喷嘴速度等值线云图

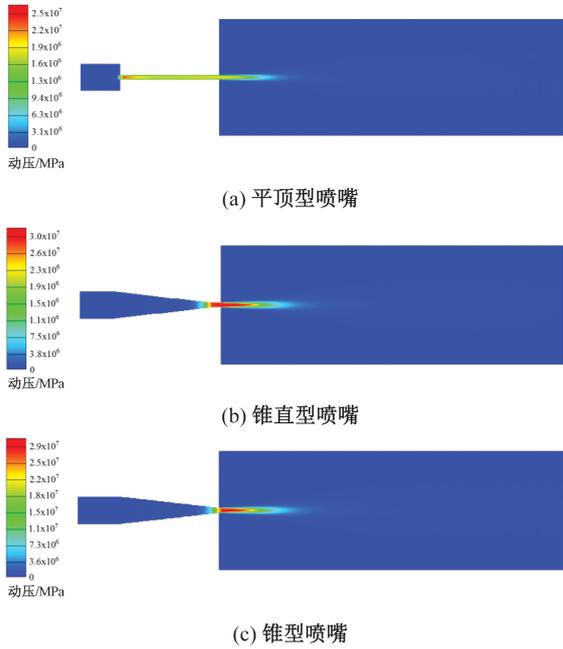


图9 三种喷嘴动压等值线图

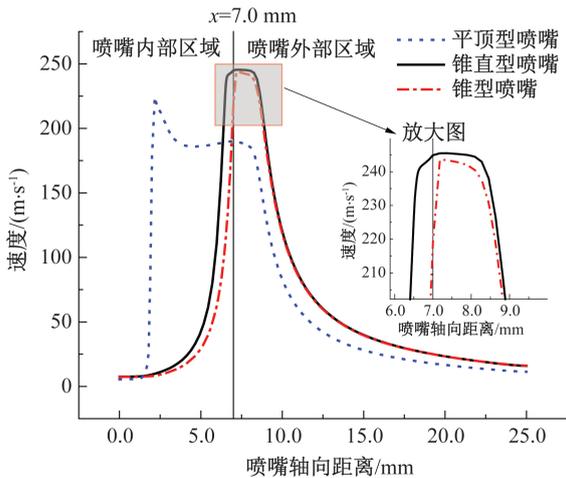


图10 三种喷嘴轴线速度曲线

另外,在图10中发现,淹没射流离开喷嘴后,由于环境中静压水的压力小于喷嘴内部压力,射流速度会瞬间增大并达到最大值,而后因阻力因素衰减,文献[20]也有类似发现。

### 3.3 喷嘴结构参数对射流特性的影响

本文选取对射流流场特性影响较大的二个参数作为研究对象,即圆锥段收缩角 $\alpha$ 和圆柱段长径比 $l/d$ 。射流的轴向速度越大表明喷嘴对水流的聚集加速能力越好,能量损失越小,对喷嘴磨损越小,稳定性越强,越适合作为无针注射器喷嘴。因此,在非淹没条件下,更改几何结构参数,通过对比射流出口轴向速度大小,得到 $\alpha$ 和 $l/d$ 的最优解。

#### 3.3.1 收缩角

$d=0.25\text{ mm}$ 、 $l/d=1.5$ 、收缩角 $\alpha$ 分别为 $8^\circ$ 、

$20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $45^\circ$ 时的锥直型喷嘴的轴线速度随轴线位置变化的速度曲线如图11所示。图11中 $x=7.0\text{ mm}$ 的直线是喷嘴内外部分界线,右侧小图为靠近 $x=7.0\text{ mm}$ 喷嘴外部区域放大图。从图11中可以发现,喷嘴收缩段为射流轴向速度急剧加速阶段,通过圆柱段时轴向速度继续增加,但变化率减小,射流的轴向速度随着收缩角的增大先变大后减小,并在 $30^\circ$ 时达到最大值。总体来看,不同角度喷嘴的射流轴线上速度变化趋势类似,均为在喷嘴出口速度有一定提高并保持一段距离,在距离喷嘴 $3.0\sim 6.0\text{ mm}$ 处速度有较大幅度衰减,而当喷嘴收缩角超过 $30^\circ$ 时,喷嘴的轴线速度衰减位置相对提前,核心区较短。综上所述,本文将锥直型喷嘴收缩角度选定为 $30^\circ$ 。

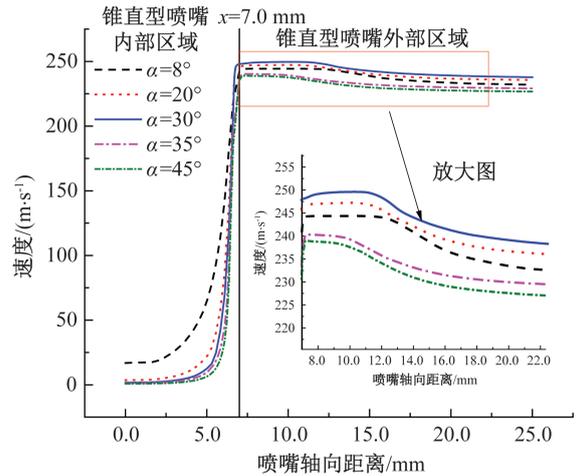


图11 五种锥角的锥直型喷嘴速度曲线

#### 3.3.2 圆柱段长径比

当收缩角 $\alpha$ 为 $30^\circ$ 时,长径比 $l/d$ 分别为 $1.0$ 、 $2.0$ 、 $3.0$ 、 $4.0$ 、 $5.0$ 时的喷嘴射流轴向速度曲线如图12所示。在图12中容易发现,喷嘴长径比为 $3.0$ 时射流轴向速度最大,并且核心区相对较长,射流聚集性较好。圆柱段对射流有一定的聚集加速作用,但是过长的圆柱段会由于摩擦的作用而消耗射流的能量,导致射流的轴向速度有所降低,并给喷嘴制造加工带来困难。因此,选择长径比 $l/d$ 为 $3.0$ 的锥直型喷嘴作为气动无针注射器的喷嘴。

#### 3.4 入口压力对注射效果的影响

在马兴江<sup>[16]</sup>和许孝华<sup>[21]</sup>的实验中,当最大喷射压强为 $32\text{ MPa}$ 时,能够达到 $20\text{ 日}$ 左右的健康杜洛克猪颈部皮下注射要求,并且对表皮未产生较大损伤。跟据文献,喷射头与注射皮肤之间距离一般取 $1\text{ mm}$ <sup>[15,22]</sup>。通过上文总结,采用 $\alpha=30^\circ$ 、 $l/d=3.0$ 的锥直型喷嘴作为气动无针注射器的结构

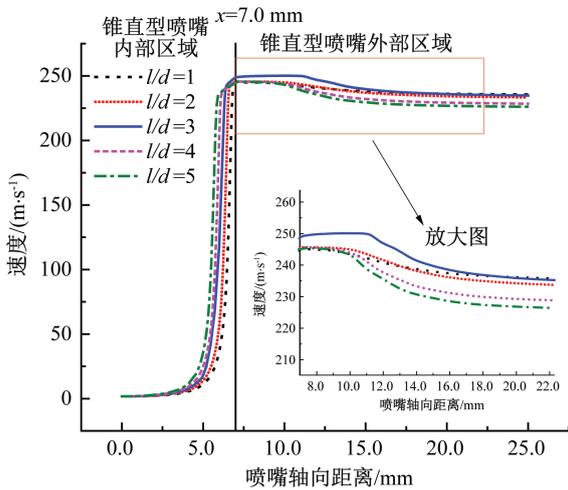


图 12 五种长径比的锥直型喷嘴速度曲线

参数。

设置压力入口分别为  $P_1 = 30$  MPa、 $P_2 = 31$  MPa、 $P_3 = 32$  MPa, 仿真分析得到喷嘴距离注射目标为 1 mm 时, 锥直型喷嘴滞止压强随径向位置变化曲线如图 13 所示。

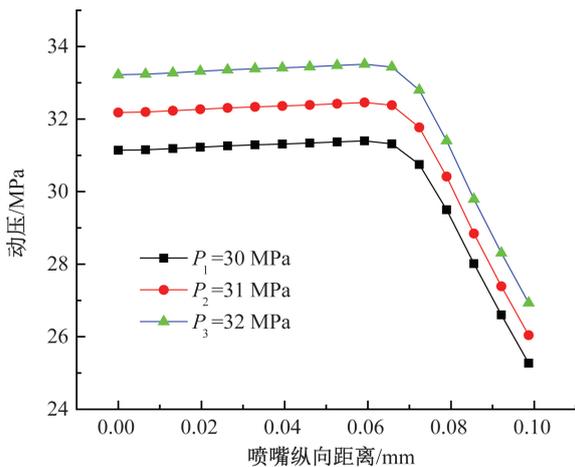


图 13 不同压力下锥直型喷嘴距离目标 1 mm 处径向滞止压力变化曲线

从图 13 中可以观察得到, 初始入口压力越大, 在距离喷嘴轴向方向 1 mm 处动压越大。入口压力  $P_2$  为 31 MPa 便能够满足兽用无针注射要求; 滞止压力的最大值不是在中心, 而是在以中心轴线为圆心, 半径 0.06~0.07 mm 的圆周内, 这是因为高压水射流的压力势能并没有完全转化为动能, 水流中还有着残余应力, 随着射流在空气中进一步发展, 水柱会有一定膨胀的趋势。

## 4 结论

本文采用计算流体动力学软件 FLUENT, 采用了 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型, 对平顶型、锥型与锥直型

喷嘴进行数值模拟, 研究淹没环境下不同喷嘴的流动机理; 采用 Standard  $k-\epsilon$  湍流模型和 VOF 多相流模型, 对非淹没环境下不同结构参数的锥直型喷嘴射流的流动特性进行探究, 得出以下结论:

a) 在淹没环境中, 相同的入口压力下, 不同形状的喷嘴产生不同的射流流场特性; 三种喷嘴射流的轴向速度均在喷嘴出口处先增大后减小。其中, 锥直型喷嘴的射流速度更高, 聚集性更好, 核心区最长, 在喷嘴处速度变化比锥型喷嘴小, 给喷嘴带来的冲击震荡小, 注射稳定性高, 对喷嘴内壁面损坏较小, 能够适当延长其使用寿命。因此宜选用锥直型喷嘴作为气动无针注射器喷嘴。

b) 在非淹没环境中, 相同的入口压力下, 收缩角及长径比的变化均会对射流轴向速度造成影响。本文设定锥直型喷嘴直径为 0.25 mm, 收缩段长度为 5 mm, 当收缩角  $\alpha < 30^\circ$  时, 喷嘴射流速度随着收缩角的增大而增大, 并在  $\alpha = 30^\circ$  时达到最大值; 当收缩角  $\alpha > 30^\circ$  时, 喷嘴射流速度随着收缩角的增大而减小。而长径比  $l/d$  合适的圆柱段能起到聚集加速的作用, 但过长的长径比会消耗射流的能量, 长径比  $l/d$  为 3.0 的时候射流速度最大。本文优化设计建议, 选用收缩角  $\alpha$  为  $30^\circ$ 、长径比  $l/d$  为 3.0、喷嘴出口直径为 0.25 mm 的锥直型喷嘴。本文优化方法和微型喷嘴射流特征的一般规律对喷嘴设计及优化也有一定指导的意义。

c) 当入口压力为 31 MPa 时, 喷嘴射流的滞止压力能够达到幼年健康杜洛克猪颈部注射要求。随着喷嘴入口压力的增加, 射流滞止压力增加, 但滞止压力最大值并不局限于中心轴线处, 而是位于以中心轴线为圆心, 半径 0.06~0.07 mm 的圆周内。

## 参考文献:

- [1] Mohizin A, Kim J K. Effect of geometrical parameters on the fluid dynamics of air-powered needle-free jet injectors[J]. Computers in Biology and Medicine, 2020, 118: 103642.
- [2] Mohizin A, Kim J K. Current engineering and clinical aspects of needle-free injectors: A review[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(12): 5737-5747.
- [3] Portaro R, Ng H D. Experiments and modeling of air-powered needle-free liquid injectors [J]. Journal of Medical and Biological Engineering, 2015, 35(5): 685-695.
- [4] 贾原杰, 廖义德, 杨凯, 等. 一种新型燃油喷嘴结构设

- 计及仿真分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 503-510.
- [5] 郑小涛, 姚景山, 傅波. 不同结构类型喷嘴对冰粒射流清洗效果的影响[J]. 液压气动与密封, 2020, 40(10): 48-53.
- [6] Ling X, Wang X D. Application of genetic algorithm for nozzle parameters optimization of waterjet propulsion system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 157/158: 604-607.
- [7] Guha A, Barron R M, Balachandar R. An experimental and numerical study of water jet cleaning process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(4): 610-618.
- [8] 张阳. 水射流切割喷嘴结构参数数值模拟优化[J]. 机床与液压, 2014, 42(19): 110-112.
- [9] 杨友胜, 张建平, 聂松林. 水射流喷嘴能量损失研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 139-145.
- [10] 张铁民, 李晟华, 梁莉, 等. 基于 FLUENT 的压电式无针注射器喷嘴射流分析[J]. 振动测试与诊断, 2019, 39(2): 273-280.
- [11] 刘文杰, 程晓阳. 基于 Fluent 的高压水射流喷嘴优化模拟研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(5): 14-18.
- [12] 何茵楠, 宋赫男. 医用射流锥直型喷嘴流动特性仿真研究[J]. 液压与气动, 2020(4): 140-144.
- [13] Shen C M, Lin B Q, Meng F W. Structure optimization and application of conical convergence high-pressure jet nozzle [J]. Advanced Materials Research, 2011, 228/229: 1001-1006.
- [14] 李震, 刘新泰, 张玉宝. 喷嘴结构参数对射流流场影响的仿真与研究[J]. 煤矿机械, 2012, 33(1): 63-65.
- [15] 陈波, 汪洪丹, 吴健康, 等. 无针注射器数值模拟和工作特性分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(2): 196-199.
- [16] 马兴江. 用于大型动物注射的无针注射系统的设计与检测[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012: 44-46.
- [17] 马文涛, 潘俊锋. 不同喷嘴结构下水射流流场及破岩特征数值模拟[J]. 煤矿机械, 2019, 40(9): 17-20.
- [18] 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.
- [19] Adibi H, Rezaei S M, Sarhan A A D. Investigation on using high-pressure fluid jet in grinding process for less wheel loaded areas [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(12): 2233-2240.
- [20] 陈春, 聂松林, 吴正江, 等. 高压水射流的 CFD 仿真及分析[J]. 机床与液压, 2006, 34(2): 103-105.
- [21] 许孝华. 一种用于规模动物疫苗注射的分体式无针注射系统的设计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016: 45-46.
- [22] Barolet D, Benohanian A. Current trends in needle-free jet injection: an update [J]. Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology, 2018, 11: 231-238.

(责任编辑:康 锋)