

引用格式:郑国雨,李伟鹏,邱晓宁.基于改进狼群算法的井下排水采气超声速喷嘴优化[J].科学技术与工程,2019,19(31):129-133
Zheng Guoyu, Li Weipeng, Qiu Xiaoning. Optimization of supersonic nozzle applied to drainage gas recovery based on improved wolf algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(31): 129-133

基于改进狼群算法的井下排水采气超声速喷嘴优化

郑国雨¹ 李伟鹏¹ 邱晓宁^{2*}

(上海交通大学航空航天学院¹,上海 200240;中国石油集团渤海钻探工程有限公司²,天津 300457)

摘要 相比超声速喷嘴,传统板孔喷嘴雾化效果不佳、携液能力不强。采用改进狼群优化算法,利用计算流体力学数值模拟,对超声速喷嘴的外形进行了优化设计,以期提高井下排水采气效率。研究结果表明,改进狼群优化算法具有高效的全局寻优能力。优化后的超声速喷嘴喉部靠后,扩张段曲率增大,产生的高强度正激波,能够增强气流中液滴流动的不平衡性,提高喷嘴的雾化效果,加速后的气流具有更好的携液能力,对于气动法排水采气具有一定的工程指导价值。

关键词 排水采气 超声速喷嘴 狼群算法 激波雾化

中图法分类号 TE358 TP18; **文献标志码** A

天然气开采过程中伴随着盐水、碳氢液体地形成,随着开采时间的增长气井压力逐渐下降,导致气井携液能力不足。液体长期沉积于井底而形成液柱,导致气井回压升高,使得天然气产量下降,甚至封堵气井而停产^[1]。为此,需要开发可靠、高效、经济的排水采气方法和技术。目前天然气井的排水采气技术主要包括气动法^[2]、机械法^[3]和化学法^[4]三类。井底节流器是一种气动排水采气装置,气液混合物经过节流器喷嘴,气流加速产生雾化作用,使得气液混合物中大液滴破碎成粒径极小雾状气流,雾状气流随加速气流带出井口,进而达到减少井底积液、增加产量的目的。

传统的排水采气节流器大多采用板孔喷嘴,但板孔喷嘴的气流加速能力有限,雾化效果不足。超声速喷嘴广泛应用于航空航天领域,例如火箭喷管、超声速风洞^[5]、航空重油发动机燃料雾化^[6]等。近年来,采用超声速喷嘴取代板孔喷嘴,使得喷嘴处的气流速度达到超声速,具有更好的雾化效果和排水采气能力。焦峰辉等^[7]研究了拉瓦尔喷嘴产生超音速雾化和高速破碎机理,并通过实验证明了拉瓦尔喷嘴的性能优势。超声速喷嘴的性能取决于气流的加速性能和喷嘴出口处激波的强度^[8],通常气流加速比越高、喷嘴出口处激波越强,雾化性能越好,

因此拉瓦尔喷嘴的型线及气井井筒的配合方式需要进一步优化,从而提高超声速气流的加速比和喷嘴出口的激波强度,以达到更好的排水采气效果。

现针对传统板孔喷嘴和拉瓦尔喷嘴的不足,采用计算流体力学数值模拟和先进的狼群优化算法,开展气井排水采气超声速喷嘴优化工作,旨在最大化超声速喷嘴的气流加速比和出口处激波强度,提升喷嘴的雾化效果。

1 参数化建模与数值仿真方法

在某排水采气节流器模型基础上,利用超声速喷嘴型面替代传统的板孔喷嘴,以期获得超声速气流加速作用。图1(a)为超声速喷嘴的剖面图,图1(b)为超声速喷嘴的几何示意图。超声速喷嘴包括渐缩段和渐扩段两部分,渐缩段与渐扩段在喉道位置水平相切。根据等熵流动理论,井底高压低速气流经过喷嘴渐缩段,气流被压缩速度升高,在喉道处达到临界状态,临界状态气流经喷嘴渐扩段膨胀,气流被加速到超声速状态。为了防止超声速气流经过强转折而产生激波,导致总压恢复系数下降,喷嘴渐扩段与井筒内壁保证水平相切。

采用 Bezier 曲线对超声速喷嘴外形进行参数化建模。贝塞尔曲线^[9]是应用于二维图形建模的数学曲线,是 B-Spline 的一种特殊形式。Bezier 曲线由线与控制点组成,控制点可以自由移动,线段首尾相连构成控制多边形。现采用 10 个控制点,以确保构造灵活多变且光顺的喷管构型,进一步开展高效的气动优化设计。 n 阶贝塞尔曲线的定义为

2019年4月16日收到

第一作者简介:郑国雨,男,硕士研究生。E-mail: zgysjtu@gmail.com。

*通信作者简介:邱晓宁,男,博士,工程师。E-mail: xiaoning0018@126.com。

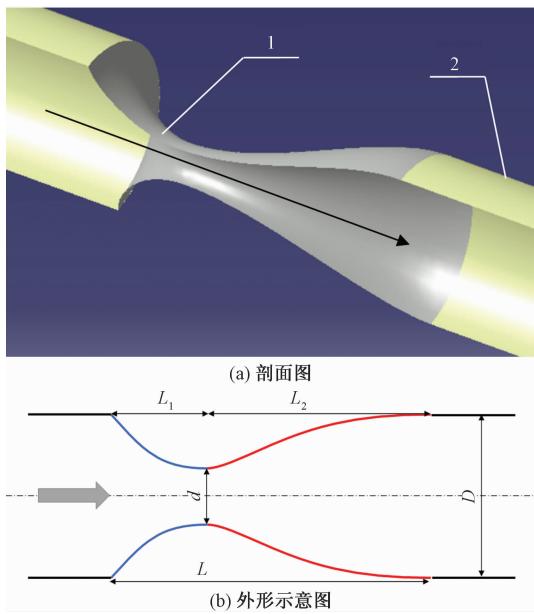


图 1 超声速喷嘴

Fig. 1 Supersonic nozzle

$$P(u) = \sum_{i=0}^{n-1} N_{i,p}(u) P_i, \quad u \in [0,1] \quad (1)$$

式(1)中: P_i 为第 i 个控制点坐标; $N_{i,p}(u)$ 为 n 阶 Bernstein 基函数, 其表达式为

$$N_{i,p}(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i}, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (2)$$

根据式(2), 四阶贝塞尔曲线可表示为

$$P(u) = (1-u)^4 P_0 + 4u(1-u)^3 P_1 + 6u^2(1-u)^2 P_2 + 4u^3(1-u)^4 P_3 + u^4 P_4 \quad (3)$$

在数值仿真中, 气流作定常假设, 且为理想气体, 忽略重力对气流的下沉作用, 忽略气流的热辐射作用。由此, 喷嘴中的气流满足如下的雷诺平均 N-S 控制方程:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} u_i u_j)}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial(\tau_{ij} - \bar{\rho} u'_i u'_j)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial(e \bar{u}_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\bar{\rho} u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\bar{\tau}_{ij} u_j - \bar{q}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

式中: x_i 代表某一坐标方向; ρ 为气体密度; u_i 为气体某一方向的流动速度; p 为气体压强; τ_{ij} 为雷诺应力张量; u'_i 为速度脉动量; e 为单位体积气体的总能量。

采用 Fluent 流体力学计算软件, 鉴于喷嘴中存在大范围的超音速流动, 采用基于密度的耦合算法对上述定常可压雷诺平均 N-S 控制方程进行求解, 采用二阶 Roe 格式进行空间离散, 采用隐式格式进行时间推进, 通量计算均为二阶迎风格式。湍流模

型选用 SA 湍流模型。利用完全多重网格 (full multi grid) 初始化构建流动初场, 以提高优化计算速度。

网格采用结构化网格, 做轴对称处理, 边界层内及速度梯度大的区域, 做网格加密处理, 边界层第一层网格高度满足 $y^+ < 1$ 。经过网格无关性验证, 最终的网格数量为 45 000。进口边界设置为压力入口边界类型, 压力为 10 MPa, 温度为 351 K, 出口边界设置为压力出口边界类型, 压力为 1.2 MPa, 温度为 281 K; 喷嘴的外侧壁面边界设置为无滑移绝热壁面边界。

2 改进狼群优化算法

2.1 狼群算法

根据狼群的狩猎过程, Song 等提出了狼群算法 (grey wolf optimizer algorithm)^[10]。狼群的狩猎分为追踪、围捕和攻击三个阶段。狼群算法中, 表现最好的三类狼 α, β, δ 引导 ω 狼向最优区域探索, 在迭代探索中, 利用 α, β, δ 三个最优狼来预测捕猎对象的可能位置。在追踪围捕过程中, 狼群位置更新公式为

$$\mathbf{D} = |\mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (7)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \quad (8)$$

式中: t 指当前代数; \mathbf{X}_p 为猎物位置; \mathbf{X} 为狼个体的位置; \mathbf{A}, \mathbf{C} 为向量系数^[11], 其表达式为

$$\mathbf{A} = 2a\mathbf{r}_1 - \mathbf{a} \quad (9)$$

$$\mathbf{C} = 2\mathbf{r}_2 \quad (10)$$

式中: $a = a_0(1-t/T)$ 随着迭代次数增加而减小, 在原始狼群算法中 a_0 通常为 2; $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 是属于 $[0,1]$ 的随机向量。图 2 表示狼群探索的过程, 即每一个狼的位置 (X, Y) 都是根据猎物的位置 (X^*, Y^*) 来进行更新的。猎物周围的每一只狼都可以根据自身与猎物之间的距离, 通过调整 \mathbf{A}, \mathbf{C} 向量来调整自身的位置。

$$\begin{cases} \mathbf{D}_\alpha = |\mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{X}_\alpha - \mathbf{X}| \\ \mathbf{D}_\beta = |\mathbf{C}_2 \cdot \mathbf{X}_\beta - \mathbf{X}| \\ \mathbf{D}_\delta = |\mathbf{C}_3 \cdot \mathbf{X}_\delta - \mathbf{X}| \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_\alpha - \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{D}_\alpha \\ \mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_\beta - \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{D}_\beta \\ \mathbf{X}_3 = \mathbf{X}_\delta - \mathbf{A}_3 \cdot \mathbf{D}_\delta \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \frac{1}{3}(\mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \mathbf{X}_3) \quad (13)$$

狼群通过当前表现最好的三种狼所处的位置确定猎物所在区域, 即狼群算法通过种群中适应度最高的三个解确定最优解的位置。

2.2 改进狼群算法

上述传统的狼群算法中, 每一代的位置是根据

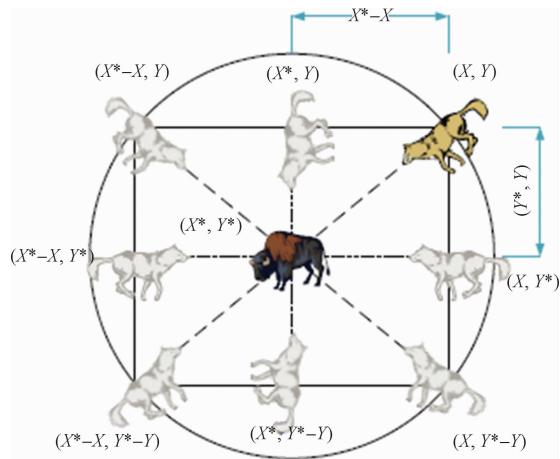


图2 狼群包围过程示意图

Fig. 2 Diagram of wolves surrounding process

α 、 β 和 δ 三只最优狼来更新的。虽然狼群算法收敛速度很快,但在探索猎物的过程中易早熟,难以找到全局最优解。莱维飞行^[12,13]是一种随机游走过程,其步长服从重尾分布,是一种非高斯随机过程。重尾分布可以以较大概率取到极大的值,即可以较大的概率进行大幅度的跳跃,从而避免局部最优、扩大搜索的范围,以获得全局最优解。现将莱维飞行与狼群算法结合,以拓展狼群算法提高其全局搜索能力,改善早熟现象。

改进狼群算法以狼群算法为框架,但取消 δ 狼,将种群分 α 、 β 和 ω 狼,以减弱最优狼对探索范围的影响。新的位置更新方式为

$$X(t) = 0.5(X_{\alpha} - A_1 \cdot D_{\alpha} + X_{\beta} - A_2 \cdot D_{\beta}) \quad (14)$$

将狼群算法与莱维飞行结合,并得到了新的位置更新方式为

$$X_{new}(t) = 0.5(X_{\alpha} - A_1 \cdot D_{\alpha} + X_{\beta} - A_2 \cdot D_{\beta}) + \alpha_L \otimes \text{Levi}(\beta) \quad (15)$$

式(5)中: α_L 是步长调整参数, \otimes 是点乘算子。通过与改进莱维飞行结合,新算法拥有了出色的局部搜索能力与全局搜索能力。同时,将贪婪原理加入到算法中。根据贪婪原理,在每一代中,适应度更高的个体将被保留,保证种群多样性的同时,抛弃较差的个体。这一过程的实现为

$$X(t) = \begin{cases} X(t), & f[X_{new}(t)] > f[X(t)] \\ X_{new}(t), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

由于每一只适应度高的狼都能够存活下来,并在下一代中起指导作用,因此贪婪原理使算法的收敛速度进一步加强。

3 超声速喷嘴优化结果与分析

选择超声速喷嘴的加速比和喷嘴后第一道激波的强度作为优化目标,进行初算后发现,这两优化目

标之间存在一定的线性关系,即当喷嘴后第一道激波强度越强时,其加速比也越大。考虑到优化对象维度比较高的情况下,选择将双目标优化问题转变成单目标优化问题,优化目标为喷嘴后的激波强度,与此同时选择将气流加速比作为约束条件,数学表达式为

$$\max(U_{\max} - U_{\min})_{\text{axis}}, \quad (U_{\max})_{\text{axis}} \geq 700 \quad (17)$$

式(17)中: U_{\max} 为轴线上最大速度; U_{\min} 为所在位置后的最小速度。

采用改进狼群算法,每代种群共 20 个,总共迭代 35 代,即样本总数为 350。优化的收敛曲线如图 3 所示。在初始的 7 代中,头狼适应值即最优值变化剧烈,23 代后头狼适应值基本保持不变,优化收敛。同时还可以发现 22 代之前适应值保持不变,随后出现较大的跳跃,体现了狼群算法经过改进后的全局搜索能力,不易早熟。

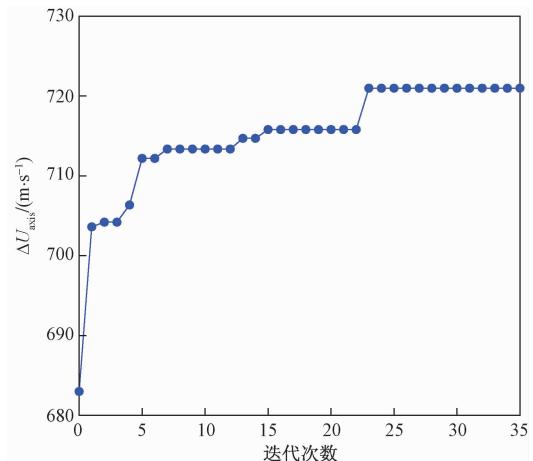


图3 优化进程曲线

Fig. 3 Curve of the optimized process

经优化得到最佳的超声速喷嘴外形,其各流场云图如图 4 所示,结合图 5 所示的轴线速度分布曲线,可以发现气流从喷嘴入口到喉部逐步加速到 1 马赫,且加速越来越快,通过喉部后,气流继续加速,直至到喉部下游 14 mm 处,气流速度达到 723 m/s。经过最大速度点后,气流经过一道正激波,速度急剧降至 0 左右。通过正激波后,气流速度又快速恢复到音速附近,之后经历两道相对较弱的斜激波流出喷嘴。气流在激波尤其是正激波前后发生的速度阶跃,能够使得在雾化过程中液滴受到较大的剪切力,增强液滴破碎的不平衡性。同时正激波后 350 K 的高温,可以进一步地提高喷嘴雾化的效果。从整体上看,喷嘴内的超音速气流呈“火焰”状,超音速气流与喷嘴外壁面之间为低速区,低速区的压力要高出超音区,这两区域间的压差对靠近管壁的液滴会形成吸引力,将其吸入超音区,从而在一定程度上保证了雾化的均匀性。

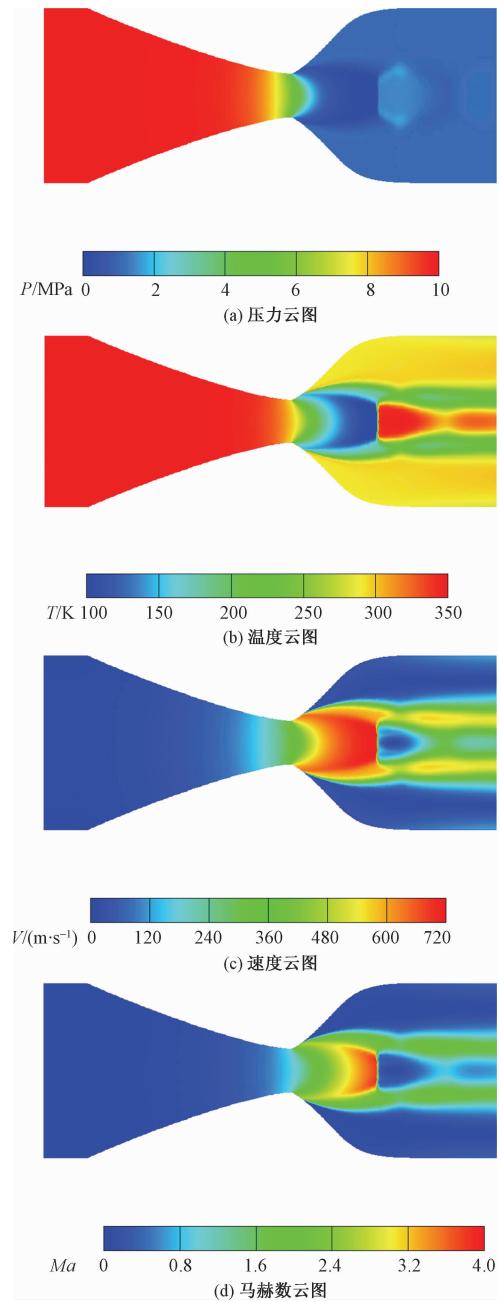


图 4 最优超声速喷嘴构型的流场云图

Fig. 4 Flow field pictures of the best supersonic nozzle

和其他喷嘴构形相比,最佳超声速喷嘴的喉部位置靠后,扩张段的外形曲线斜率变化相对较快,导致喉部下游的超音速区沿径向宽度较大,更容易形成高强度正激波,而非斜激波。

4 结论

基于改进狼群算法对超声速喷嘴外形进行优化设计,可以得到以下三个主要结论。

(1) 利用改进狼群算法,解决高维的优化问题,保证优化效率的同时,能够有效地避免早熟现象。

(2) 超声速喷嘴中出现的正激波,可以使得气

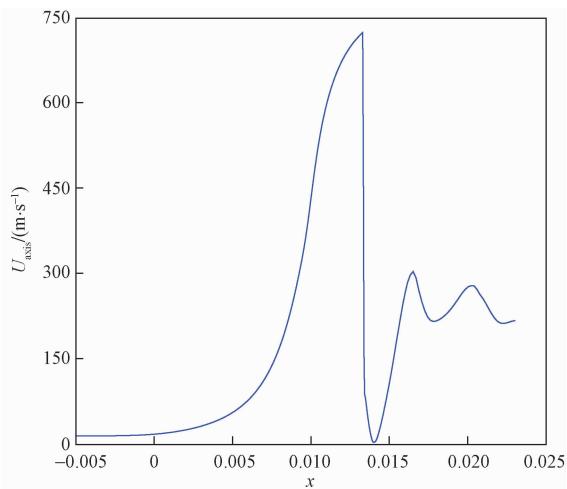


图 5 最优超声速喷嘴构型的轴线速度曲线

Fig. 5 Axis velocity curve of the best supersonic nozzle

流出现极大的速度阶跃和温度陡增,增加了液滴的不平衡性,提高了雾化的效果。

(3) 在喷嘴长度与喉部缩比一定的情况下,喉部位置靠后,喷嘴扩张段曲率变化较大的喷嘴外形,更易形成高强度正激波,产生更高的气流加速比。

参 考 文 献

- 焦峥辉. 超音速喷管雾化器设计及理论研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2017
Jiao Zhenghui. Design and theoretical study of supersonic nozzle atomizer[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017
- 张荣军, 乔 康. 柱塞气举排水采气工艺技术在苏里格气田的应用[J]. 钻采工艺, 2009, 32(6): 118-119
Zhang Rongjun, Qiao Kang. Application of plunger lift drainage gas recovery technology in Sulige gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(6): 118-119
- 罗俊渊. 电潜泵排水采气工艺在四川气田的应用研究[J]. 钻采工艺, 1993(1): 28-34
Luo Junyun. Applied research of electric submersible pump drainage gas recovery technology in Sichuan gas field [J]. Drilling & Production Technology, 1993(1): 28-34
- 田建峰, 曹成寿, 刘建英, 等. 苏里格气田泡沫排水采气工艺应用技术难点及对策[J]. 钻采工艺, 2016, 39(3): 67-69
Tian Jianfeng, Cao Chengshou, Liu Jianying, et al. Application difficulties and countermeasures of foam draining gas recovery technology in Sulige gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(3): 67-69
- 任泽斌, 廖达雄, 张国彪. 2 m × 2 m 超声速风洞引射器气动设计[J]. 航空动力学报, 2014, 29(10): 2288-2293
Ren Zebin, Liao Daxiong, Zhang Guobiao. Aerodynamic design of the ejector of 2 m × 2 m supersonic wind tunnel [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(10): 2288-2293
- 王思奇, 杨海青. 航空重油发动机气助雾化喷嘴雾化机理仿真[J]. 内燃机学报, 2018, 36(2): 127-135
Wang Siqi, Yang Haiqing. Simulation on atomization mechanism of air-assisted injector for aircraft heavy fuel engine [J]. Transactions of

- CSICE, 2018, 36(2) : 127-135
- 7 焦峥辉, 刘建平, 赵 稳. 超音速雾化排水采气研究[J]. 石油化工应用, 2016, 35(3) : 54-56
Jiao Zhenghui, Liu Jianping, Zhao Wen. Research of supersonic atomization draining gas recovery[J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(3) : 54-56
- 8 程江峰, 马齐江, 王开松, 等. 气体压强对新型超音速气雾化喷嘴流场的影响[J]. 煤矿安全, 2017, 48(2) : 160-162
Cheng Jiangfeng, Ma Qijiang, Wang Kaisong, et al. Effect of pressure on flow field of new supersonic speed gas atomization nozzle[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(2) : 160-162
- 9 廖炎平, 刘 莉, 龙 腾. 几种翼型参数化方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3) : 160-164
Liao Yanping, Liu Li, Long Teng. The research on some parameterized methods for airfoil[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(3) : 160-164
- 10 Song X, Tang L, Zhao S, et al. Grey wolf optimizer for parameter estimation in surface waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 75 : 147-157
- 11 Komaki G M, Kayvanfar V. Grey wolf optimizer algorithm for the two-stage assembly flow shop scheduling problem with release time [J]. Journal of Computational Science, 2015, 8 : 109-120
- 12 Viswanathan G M, Afanasyev V, Buldyrev S V, et al. Lévy flights in random searches[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2000, 282(1) : 1-12
- 13 Viswanathan G M, Raposo E P, Luz M G E D. Lévy flights and superdiffusion in the context of biological encounters and random searches[J]. Physics of Life Reviews, 2008, 5(3) : 133-150

Optimization of Supersonic Nozzle Applied to Drainage Gas Recovery Based on Improved Wolf Algorithm

ZHENG Guo-yu¹, LI Wei-peng¹, QIU Xiao-ning^{2*}

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiaotong University¹, Shanghai 200240, China;
Bohai Drilling Engineering Co., Ltd.², Tianjin 300457, China)

[Abstract] The traditional plate bore has relatively poor atomization effect and insufficient drainage capacity in the process of drainage gas recovery compared with supersonic nozzle. Based on improved wolf algorithm and CFD numerical simulation, the optimal design of supersonic nozzle has been conducted in order to increase the efficiency of drainage gas recovery. The results show that improved wolf algorithm possesses better global search ability. And the nozzle with best aerodynamic performance has a throat near the exit and expanding segment with large curvature change. This configuration feature is good for generating strong normal shock wave which causes more drastic instability and better atomization of droplet in airstream. The results achieved would be of some useful engineering guidelines for drainage gas recovery with aerodynamic methods.

[Key words] drainage gas recovery supersonic nozzle wolf algorithm shock-wave atomization