

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.04.007

塑料近红外分选设备喷吹分离的仿真研究^{*}

于 辉¹, 尹凤福^{2,*}, 闫 磊², 刘 振², 薛莲莲², 张 超²

(1. 北京电子科技职业学院 汽车工程学院, 北京 100176; 2. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:针对塑料分选装置中喷吹不准确、耗气量大等问题,提出了一种基于维多辛斯基曲线的流线型喷嘴。利用计算流体力学(CFD)软件,对喷嘴结构进行了二维与三维建模,运用 Fluent 进行了求解,选择湍流模型中的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型进行了计算,从射流速度、射流核心段长度以及耗气量等方面分析了喷嘴总长度、收缩段长度、出口直径以及收缩比等因素对喷嘴射流的影响。仿真结果表明:出口直径对喷嘴射流影响最大,喷嘴总长度、收缩段长度以及收缩比对喷嘴性能的影响相对较小;当喷嘴总长度为 25 mm,收缩段长度为 4 mm,出口直径为 5 mm,收缩比为 1.6 时,喷嘴的喷吹性能相对较好且耗气量较低。

关键词:喷嘴;计算流体力学;仿真模拟;维多辛斯基曲线

中图分类号:TH47;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)04-0378-05

Simulation of injection separation for near infrared plastics sorting device

YU Hui¹, YIN Feng-fu^{2,*}, YAN Lei², LIU Zhen², XUE Lian-lian², ZHANG Chao²

(1. School of Automotive Engineering, Beijing Polytechnic, Beijing 100176, China; 2. School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at the problems of inaccurate ejecting and high air consumption in the plastic sorting device, a streamlined nozzle based on the Vidosinski curve was proposed. The two-dimensional and three-dimensional modeling of the nozzle were made by means of computational fluid dynamics (CFD) software. The Fluent software was used to solve and the Realizable $k-\varepsilon$ model in the turbulence model for calculation was selected. The influence of total length of the nozzle, the length of the constriction, the outlet diameter and the shrinkage ratio on jet were analyzed from the aspects of jet velocity, length of jet core segment and air consumption. The simulation results indicate that the outlet diameter has the greatest influence on the jet of the nozzle, and the total length of the nozzle, the length of the constriction and the shrinkage ratio have a relatively small influence on the performance of the nozzle. When the total length of the nozzle is 25 mm, the length of the constriction with 4mm, the outlet diameter with 6mm and the shrinkage ratio with 1.6, the nozzle has a relatively good ejecting performance and consumes less air.

Key words: nozzle; computational fluid dynamics(CFD); simulation; Vitozinsky curve

0 引 言

近红外光谱识别分选是塑料分选领域内一项先进的技术,具有快速、连续、精确的特点,近年来逐渐成为分选行业研究的热点^[1]。喷嘴是近红外光谱识别技术中的重要部件,喷嘴的空气射流会在极短时间内击

中目标物,给予目标物一个向上的推进力从而改变目标物飞行下落的轨迹,斜抛落入远端的料仓,未被喷吹的物料则经过平抛运动落入料仓,实现分离的目的^[2]。研究者一直致力于提高喷嘴喷吹性能的研究。王国志等人^[3]利用 CFD 软件对锥形喷嘴进行了模拟分析,得出了锥形喷嘴的射流距离比较长;庞生敏等

收稿日期:2018-08-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575287)

作者简介:于辉(1978-),女,北京人,本科,实验师,主要从事机械设计与制造方面的研究。E-mail:529878096@qq.com

通信联系人:尹凤福,男,博士,教授。E-mail:yinf3@126.com

人^[4]研究了圆柱形喷嘴,通过计算得出了喷嘴的出口速度,比较了各个不同结构的喷嘴出口流速来确定最佳的喷嘴结构形式;贾维维^[5]研究了不同长度的喷嘴对射流的影响,结果表明:随着喷嘴长度的增大,喷嘴出口截面的压力分布越稳定。

喷嘴是分离射流的出口,分离过程中射流喷嘴的冲击是物料精确、有效分离的关键,而射流的形成和性质与喷嘴具有非常重要的关系。因此,为了提升喷嘴的精度与效率,本研究将基于流体力学和空气动力学的理论,借助 CFD 工具 ANSYS Fluent 对射流喷嘴进行模拟优化。

1 喷嘴的建模与边界条件

1.1 维多辛斯基曲线

流线型的设计能显著减少壁面的压差阻力,使流体流动时能够更好地贴合边界层,降低湍流,避免了能量的耗散。经过文献查阅以及调查研究,本文采用维多辛斯基曲线的线型来设计流道(该曲线已广泛用于飞行器、风洞的设计,并具有很好的效果^[6])。

维多辛斯基曲线示意图如图 1 所示。

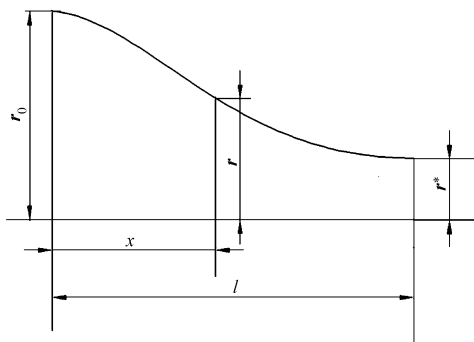


图 1 维多辛斯基曲线示意图

维多辛斯基曲线方程可以表示为:

$$\left(\frac{r_*}{y}\right)^2 = 1 - \left(1 - \frac{1}{C}\right) \frac{\left(1 - \left(\frac{x}{l}\right)^2\right)^2}{\left(1 + \frac{1}{3}\left(\frac{x}{l}\right)^2\right)^3} \quad (1)$$

式中: C —收缩比, $C = r_0/r_*$; r_0 —入口半径; r_* —出口半径; l —收缩段的长度。

本文利用 Matlab 程序从曲线方程上获取采样点,用来绘制样条曲线。采样点的数量控制为 20 个。

生成采样点的 Matlab 代码为:

```
r0 = L1;
r1 = L2;
Length = L3;
x = linspace(0, L3, N);
```

```
r = r1./sqrt(1 - (1 - (r1/r0)) * ((1 - (x/Length).^2).^2)./(1 + ((x/Length).^2)/3).^3);
plot(x, r, 'g');
A = [x; r];
fi = fopen('point.dat', 'wt');
fprintf(fi, '%2.3f\t%2.4f\n', A);
fclose(fi);
```

程序中: L_1 —入口直径; L_2 —出口直径; L_3 —收缩段长度; O —采样点初始计数点; N —采样点数量。

在 Matlab 程序主界面中,输入以上程序代码,根据所需尺寸,设定 r_0 、 r_1 和 $Length$ 的数值,输入后进行计算,可得到相应的 20 个采样点,最后绘制维多斯基型喷嘴曲线。

1.2 几何模型与边界条件

塑料分选设备的分离装置主要采用阵列排布的喷嘴。根据喷嘴结构,建立单个的喷嘴几何模型,包括二维平面模型和三维立体模型^[7]。

鉴于喷嘴的形状以及流场的对称性,为了简化并降低数值计算量,本研究采用二维计算模型对喷嘴的射流内外流场进行模拟。内流场指的是喷嘴内部的区域,外流场指的是射流在大气中的作用范围。

二维计算网格划分及边界条件如图 2 所示。

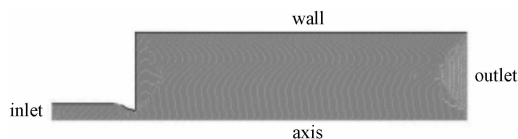


图 2 二维计算网格划分及边界条件

图 2 中,喷嘴后方的矩形区域为外流场,入口处边界类型设为 pressure inlet(压力入口),下轴线边界设为 axis(轴对称),作为三维的旋转轴对称边界。在图 2 右端出口设定边界条件为 pressure outlet(压力出口),其余边界条件设定为 wall。

1.3 湍流设置及初始参数

当流体的流速逐渐增加时,流动变得越来越难以稳定,扰动逐渐增强,发展形成不稳定不规则的湍流。湍流会引起动量、热量和质量的传递,从而使得焓值不能够充分转化为喷吹方向的动能,造成很大的流动阻力和能量耗散,这对于喷嘴设计具有很强的负面影响。

通常,可以利用雷诺数来判定流体的流动状态。一般管道雷诺数 $Re \geq 4\,000$ 为湍流状态, $Re = 2\,320 \sim 4\,000$ 为过渡状态。

雷诺数的计算公式为:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (2)$$

式中: v —流体的流速; ρ —流体密度; η —动力黏性系数; d —管道直径。

根据喷嘴参数,室温下, v 取值 300 m/s;0.2 MPa 下空气密度 $\rho \approx 2.338 \text{ kg/m}^3$; $\eta \approx 17.9 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; d 取 6 mm,则计算可得:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} = 235\ 106 > > 4\ 000 \quad (3)$$

公式(3)证明喷嘴射流存在湍流。由于湍流的复杂性,CFD 软件提供了丰富的湍流模型,根据所用的 Fluent 软件提供的参考,笔者结合文献选取 Realizable $k-\varepsilon$ 模型进行计算^[8]。该模型可以有效预测圆管射流的湍流状态^[9]。

其他初始参数设置如表 1 所示。

表 1 初始参数设置

参数名称	入口压力/MPa	出口压力/MPa	空气温度/K
数值	0.2	0.1 MPa	300

表 1 中,入口压力为喷嘴的喷出压力,出口压力为外流场压力,空气温度为仿真过程中的出、入口温度^[10]。

2 计算与结果分析

根据维多辛斯基曲线特性以及喷嘴结构,本文对喷嘴的总长度、收缩段长度、出口直径以及收缩比进行仿真模拟计算,并从射流速度、射流核心段长度以及耗气量等方面分析每种因素对于喷嘴射流的影响。

2.1 喷嘴总长度

喷嘴的总长度分别设置为:20 mm、25 mm、30 mm、35 mm、40 mm、45 mm、50 mm。仿真结果显示:不同喷嘴总长度的轴线速度的基本变化规律相似,射流核心区的长度近似,最高速度也几乎相同,因此喷嘴不同的总长度这对于喷嘴的速度影响不大。通过耗气量对比,可得出起耗气量在 0.138 kg/min 附近波动。因此,根据模拟仿真数据可以得出喷嘴长度对于射流影响较小。其中,射流核心段指的是流体射出后,保持速度高速集中的区段。

喷嘴速度云图如图 3 所示。

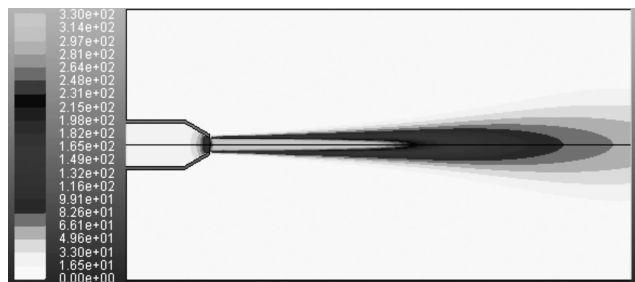


图 3 喷嘴速度云图

图 3 中,轴线附近区域所代表的即射流核心段,其长度为核心段长度;长度越长表明射流越集中,越有利于分选装置精确喷吹击打^[11]。

流体在管道内存在沿程阻力,这是由于流体壁面的不光滑产生的摩擦以及流体自身的内摩擦所致^[12-13]。随着管长增加,必定会对射流产生一定影响。但是此处仿真结果显示,喷嘴的长度对于射流的影响不明显,其原因是仿真模拟未考虑流道内壁面的摩擦。因此,下面引入数值方法来计算沿程阻力。

对于圆管道有压流的沿程阻力损失,一般用达西—韦斯巴赫公式进行计算,即:

$$h_f = \lambda \frac{l v^2}{2 d g} \quad (4)$$

式中: λ —沿程阻力系数; l —喷嘴长度; d —直径; v —速度。

从达西公式可以看到,沿程压力损失与管长 l 成正比,因此管长越短,能量损失越小,越利于降低能耗。因此,综合考虑后将喷嘴的总长定为 25 mm。

2.2 收缩段长度

根据喷嘴结构,收缩段长度分别取 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm。根据仿真实验结果得出:不同收缩段长度的喷嘴射流状况比较相似,没有明显的差异,因此,收缩段的长度对于射流速度影响较小。

不同收缩段长度耗气量对比如图 4 所示。

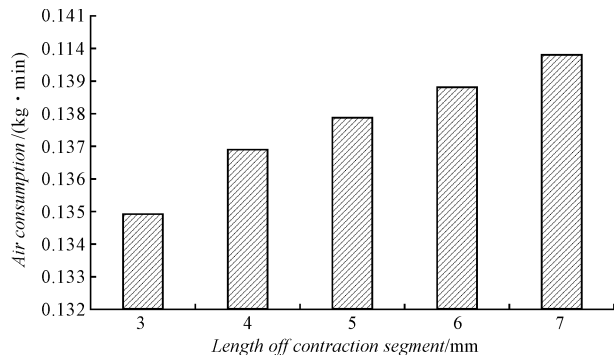


图 4 不同喷嘴收缩段长度耗气量对比

根据图 4 可以观察到:随着收缩段长度的不断增加,耗气量在不断上升。在功能相近的情况下选择低耗气量的喷嘴,因此喷嘴的收缩段长度选为 4 mm。

2.3 出口直径

出口直径按照从小到大顺序依次取值,半径为 1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm、4 mm、5 mm,根据对不同出口直径的模拟仿真数据进行对比分析,得到的不同出口半径的喷嘴轴线速度对比图,如图 5 所示。

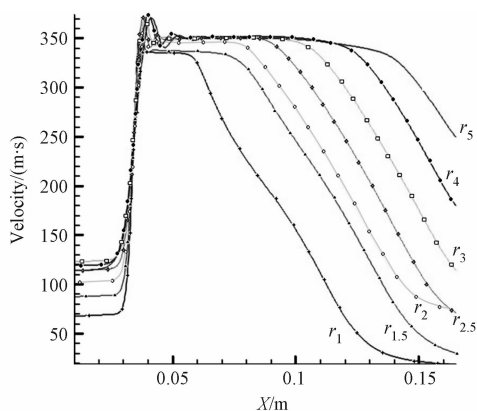


图5 不同出口半径的喷嘴轴线速度对比

根据图5可以看出:不同出口直径对于射流最高速度和核心段长度影响很大;随着半径的增加,从1 mm到2.5 mm,出口最高速度呈现明显的递增趋势,半径从2.5 mm开始到5 mm,喷嘴所能达到的最高速度处于相差不大的范围内,除去喷嘴口因膨胀造成的速度波动外,射流核心段的速度均维持在350 m/s左右。此外,出口半径对于射流核心段长度也具有明显的影响,由图5可知:随着半径增大,射流核心段的长度也在逐渐增长,且相当明显。

对于喷吹分离设备而言,为了避免喷嘴收到物料的碰撞与灰尘干扰,待分选物料与喷嘴的垂直距离一般要大于50 mm,因此喷嘴的射流核心段长度最好接近或超过这个距离。从图5看到:1 mm、1.5 mm、与2 mm半径的喷嘴显然达不到设计需求,应予以排除。

仿真结果显示:不同出口半径耗气量随着喷嘴半径增加耗气量也在逐渐增加,且这种趋势相当稳定。因此设计中的选择是在达到分选速度要求以及射流核心段长度等参数后,尽量选择小的出口直径以减少耗气量,因此,综合考虑收缩选择喷嘴出口直径为5 mm。

2.4 收缩比

入口半径与出口半径的比值称为喷嘴的收缩比,即:

$$C = \frac{r_0}{r^*} \quad (5)$$

根据类似获得应用的喷嘴尺寸,喷嘴收缩比分别设为1.2、1.4、1.6、1.8、2、3、4进行仿真计算。

不同收缩比喷嘴耗气量对比如图6所示。

从图6可看出:收缩比为4耗气量最少,但是收缩比从1.6~4变化不大。同时考虑喷嘴形状,收缩比为4时入口直径已经达到16 mm,对于制造和安装都会

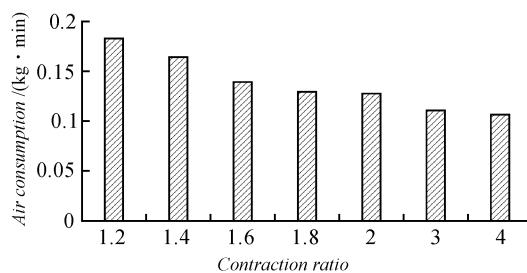


图6 不同收缩比喷嘴耗气量对比

有不利影响。而通过不同收缩比条件下喷嘴轴线速度的对比发现,不同收缩比的喷嘴在一定压力下所能达到的射流速度差别不大,但射流核心段长度有所区别。收缩比为1.6和4时射流核心段长度最长。同时考虑喷嘴形状,收缩比为4时入口直径已经达到16 mm,对于制造和安装都有不利影响,因此综合考虑选择收缩比为1.6。

3 结束语

利用CFD软件对维多辛斯基曲线流道的收缩喷嘴进行仿真模拟计算,本文对可能影响其射流的多个因素进行了分析,结果显示:维多辛斯基曲线型喷嘴的出口直径对喷嘴射流的影响显著,喷嘴的总长度、收缩段长度以及收缩比影响较小;喷嘴的总长度对射流速度和耗气量影响较小,但是较短的总长度由于降低沿程阻力损失,降低损耗;收缩段长度对于射流速度影响较小,但是长度越短越有利于降低耗气量,从而降低分选设备使用成本;出口直径对喷嘴的射流影响显著,直径越大,等速核心段速度越长,且耗气量上升;收缩比对于高速核心段长度具有一定影响,且随着收缩比的增大,耗气量会越来越低,有利于设备的节能降耗。

研究发现:多个因素对维多辛斯基曲线收缩喷嘴射流性能产生影响,当喷嘴总长为25 mm、出口直径为5 mm、收缩比为1.6、收缩段长度为4 mm时,分离效果最好。

参考文献(References):

- [1] 尹凤福,闫磊,韩清新,等.近红外光谱(NIR)分选技术在塑料分选领域的应用[J].环境工程,2017,35(12):134-138.
- [2] 胡彪,王树桐,汤桂兰,等.基于Fluent的废旧塑料精准分选装置设计研究[J].应用力学学报,2015,32(6):1075-1081,1109.
- [3] 王国志,冉春燕,邓斌,等.基于Fluent远距离冲洗喷嘴的射流特性研究[J].液压气动与密封,2016,36(1):31-

- 34.
- [4] 庞生敏,陈沛民. 基于 CFD 的圆柱形喷嘴设计[J]. 机械制造与自动化,2011,40(1):41-42.
- [5] 贾维维. 基于 ANSYS Fluent 的不同长度喷嘴射流冲击分析[J]. 冶金设备,2016,1(2):33-36.
- [6] 李敏霞,李秀辉,陈佩寒. 一种实用的维多辛斯基曲线风洞收缩段展开方法研究[J]. 应用能源技术,2010,1(8):1-4.
- [7] LEE H, WRAY T, AGARWAL R K. CFD performance of turbulence models for flow from supersonic nozzle exhausts [C]. 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Washington :AIAA,2016.
- [8] 胡静艳,谭锦凌,李振华. 水射流贻贝单边脱壳装备喷嘴内流场数值仿真研究[J]. 机电工程,2018,35(8):828-832.
- [9] 王艳芬,禹言芳,孟辉波,等. 圆形喷嘴射流特性模拟方法优化选择[J]. 沈阳化工大学学报,2016,30(1):55-59.
- [10] 王金锋,李文俊,谢 晶,等. 喷嘴出口流速与钢带表面换热特性的 CFD 模拟[J]. 流体机械,2018,46(12):73-18.
- [11] 杨 岩,朱 荣,赵 飞. 收缩段型面对超音速氧气射流特性影响的数值模拟[J]. 工业加热,2016,45(3):9-12.
- [12] 李华玉,刘中良,梁金国. 摩阻存在条件下喷管设计的分析[J]. 石油地质与工程,1998,1(4):36-39.
- [13] 李文静,蔡 超,李国骥. 因喷嘴气化炉烧嘴接管关键加工工艺技术研究[J]. 压力容器,2017,34(5):70-74.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

于 辉,尹凤福,闫 磊,等. 塑料近红外分选设备喷吹分离的仿真研究[J]. 机电工程,2019,36(4):378-382.

YU Hui, YIN Feng-fu, YAN Lei, et al. Simulation of injection separation for near infrared plastics sorting device[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(4):378-382.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 377 页)

- [6] 苏东风. 高精度标定转台光栅测角系统关键技术研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2011.
- [7] 高 旭. 莫尔条纹光电信号自动补偿技术研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2014.
- [8] 冯英翹. 提高小型光电编码器分辨率和精度的方法研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2014.
- [9] TAN K K, TANG K Z. Adaptive online correction and interpolation of quadrature encoder signals using radial basis functions[J]. **Transactions on Control Systems Technology**, 2005,13(3):370-377.
- [10] KIM J A, JAE W K, KANG C S, et al. A digital signal processing module for real-time compensation of nonlinearity in a homodyne interferometer using a field-programmable gate array [J]. **Measurement Science and Technology**. 2009, 017003(1):1-5.
- [11] WU X L, ZHANG H, TSENG Y Y, et al. A robust sinusoidal signal processing method for interferometers [C]. Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements, Guiyang:IEEE,2013.
- [12] 李 琳. 基于光栅衍射光干涉的位移测量技术研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.

[编辑:李 辉]