

# 提高附壁效应真空发生器最大真空度的研究

李建鑫,李小宁

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**为提高附壁效应真空发生器的最大真空度,设计一种偏转射流入射角度的新型斜射式附壁效应真空发生器。通过仿真与试验研究射流偏转角 $\theta$ 及射流缝隙宽度 $h$ 对真空度的影响规律。结果表明:随着射流偏转角 $\theta$ 和射流缝隙宽度 $h$ 由小变大,真空发生器真空度均呈先增大后减小的变化趋势;当射流偏转角 $\theta=30^\circ$ 、射流缝隙宽度 $h=0.16$  mm时,真空度最大;在供气压力为0.5 MPa时,斜射式附壁效应真空发生器的最大真空度为63.8 kPa,相较于目前的附壁效应真空发生器最大真空度52 kPa提高了约23%。

**关键词:**真空发生器;附壁效应;真空度;结构

**中图分类号:**TH138 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)03-0050-04

## Research on Improving the Maximum Vacuum of Coanda Effect Vacuum Ejector

LI Jianxin, LI Xiaoning

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To improve the maximum vacuum of the Coanda effect vacuum ejector, a new type of Coanda effect vacuum ejector of deflected jet angle was designed. The effects of jet deflection angle  $\theta$  and jet gap width  $h$  on vacuum degree are studied through simulations and experiments. The results show that as the jet deflection angle  $\theta$  and the jet gap width  $h$  increase from small to large, the vacuum degree of the vacuum generator first increases and then decreases; when the jet deflection angle  $\theta = 30^\circ$  and the jet gap width  $h = 0.16$  mm, the vacuum is maximum; when the air supply pressure is 0.5 MPa, the maximum vacuum of the ejector is 63.8 kPa, which is about 23% higher than 52 kPa of the Coanda effect vacuum ejector.

**Keywords:** vacuum ejector; Coanda effect; vacuum; structure

## 0 引言

在工业自动化生产中,使用真空吸取是实现物品吸取和搬运的重要方式之一,而真空发生器是实现真空吸取的常用基本元件<sup>[1]</sup>。附壁效应真空发生器用作真空发生元件可以减少真空吸取系统元件数量并简化真空吸取和真空解除的控制流程,在用于颗粒物料的直接吸送方面也有其优势,因而在研发和应用方面都受到了广泛的重视。但目前附壁效应真空发生器的最大真空度较低,针对这一问题,开展了相应研究,希望通过关键结构的改变,提高其最大真空度。

目前对于附壁效应真空发生器的研究主要集中于空气抽吸或真空吸取较轻物品等方面<sup>[2-3]</sup>,在提高真空度方面的研究较少。KIM H D等<sup>[4]</sup>对附壁效应真空发生器内部流域进行了数值仿真分析,结果表明真空发生器的性能与喷嘴处的结构参数及压力比有关。GUERRIERO V<sup>[5]</sup>提出将附壁效应真空发生器用于固体颗粒的传输,并通过仿真和试验验证了这一方案的可行性。但该真空发生器仅可以吸取颗粒直径 $<3$  mm、质量流量比 $<2$ 的颗粒型物料。吕苏荷等<sup>[6]</sup>研究了射流缝隙宽度与壁面曲率比值( $b/R$ )对附壁效应真空发生器性能的影响规律。结果表明 $b/R$ 值对真空发生器工作性能的影响显著,当 $b/R$ 值在1/50左右时真空发生器的性能最佳,但其并未研究射流入射角

度对真空度的影响规律。

迄今为止,为提高附壁效应真空发生器性能而进行的结构方面的研究大多集中在改变射流缝隙宽度、附壁曲面半径、扩散管喉部直径、扩散管长度、扩散管锥角等方面,但成效不大。本文提出一种斜射式附壁效应真空发生器(改变射流入射方向),旨在提高真空发生器的最大真空度。

## 1 斜射式附壁效应真空发生器的结构设计

### 1.1 斜射式真空发生器总体结构设计

图1为现有附壁效应真空发生器的结构示意图。附壁效应真空发生器工作原理是:压力为 $P_0$ 的初级气流从供气口进入并充满储气腔进入射流缝隙,气流在缝隙中加速形成高速射流。由于附壁效应及卷吸作用,射流沿附壁曲面流动并卷吸真空腔内气体,真空腔产生负压。由图1可知射流从缝隙射出时,其初始方向垂直于真空发生器吸气和排气流道轴线( $x$ 轴)。根据这一特点,将此类结构的真空发生器称之为正射式附壁效应真空发生器。而目前正射式附壁效应真空发生器的最大真空度仅为52 kPa,真空度较小。为提高其最大真空度,提出改变射流入射角度的方案。

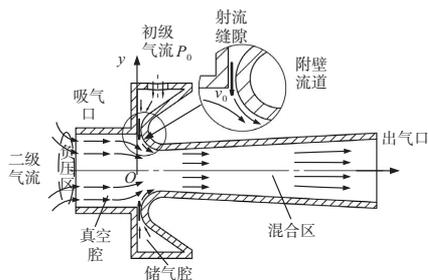
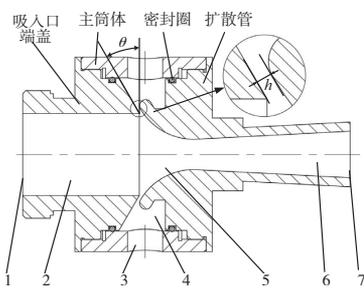


图1 正射式附壁效应真空发生器结构示意图

设计斜射式附壁效应真空发生器的总体结构,如图2所示。斜射式真空发生器由3个零件组成,分别是吸入口端盖、主筒体、扩散管。3个零件配合密封圈装配后组成的内部空间形成了斜射式附壁效应真空发生器的内部流体域。根据各区域的功能可划分为供气口、储气腔、吸气口、真空腔、附壁混合区、扩散混合区以及出气口。



1—吸气口;2—真空腔;3—供气口;4—储气腔;  
5—附壁混合区;6—扩散混合区;7—出气口。

图2 斜射式附壁效应真空发生器总体结构图

## 1.2 斜射式真空发生器的关键结构设计

图3为斜射式真空发生器局部示意图。射流缝隙是附壁效应真空发生器的关键结构之一,为改变射流入射方向,将吸入口端盖的配合面设计成具有一定角度的锥面,该锥面与在附壁曲面上的切线 $l$ 平行,切线 $l$ 在附壁曲面上的切点 $B(D)$ 是当射流缝隙宽度 $h=0$ 时锥面与扩散管的接触点。

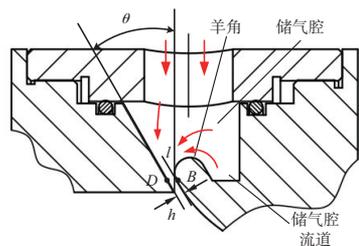


图3 射流缝隙的结构形式示意图

供气压力是影响真空发生器真空度的关键影响因素之一。储气腔负责将压缩气体存储并输送至射流缝隙。附壁效应真空发生器的储气腔为环形结构(图2)。为了使气体快速分布于环形腔内,设计储气腔流道。为了使储气腔内气体在低阻力的流态下流入射流缝隙,在斜射缝隙的几何条件下储气腔流道与附壁曲面在结构上要实现圆顺过渡,特地设计“羊角”结构(图3)。在结构上,“羊角”是半圆弧,弧线左侧与附壁曲线相切,在右侧与储气腔流

道直线相切。

## 2 关键结构参数对真空度影响的仿真分析

### 2.1 数值计算模型

真空发生器的流体仿真仅涉及其内部流场,因此将内部流体域作为数值仿真的几何模型,使用 ANSYS Fluent 仿真软件对真空发生器进行流体仿真计算。使用 Mesh 对模型进行网格划分,如图4所示。

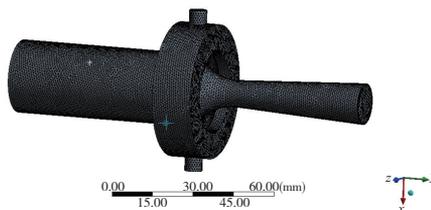


图4 斜射式附壁效应真空发生器仿真模型及网格划分

选择湍流模型为标准 $k-\omega$ 模型并设置进气口与出气口的边界条件为压力输入、输出。

与仿真相关的说明:真空发生器在进行真空度测试时需要接入气动回路,气管等元件的内部流域也会对真空度产生一定影响。为使仿真结果贴近于真实情况,在仿真模型吸气口加上了一定长度的连接管件。

### 2.2 射流偏转角 $\theta$ 对真空度的影响

#### 1) 验证改变射流偏转角的有效性

将射流角从正射改变为偏转一个角度以期提高最大真空度,这是本文提出的一个思路。在展开后续工作之前,首先需要对此构思进行验证。为此,在其他结构参数不变的条件下,改变真空发生器的射流入射角度,分别取射流偏转角 $\theta=0^\circ$ 和 $20^\circ$ ,对两个不同射流偏转角的模型进行仿真分析。仿真结果表明,在供气压力为 $0.5\text{ MPa}$ 、 $\theta=0^\circ$ 时,真空度 $P_v=35.0\text{ kPa}$ ;当 $\theta=20^\circ$ 时,真空度 $P_v=61.4\text{ kPa}$ 。从仿真结果可得,改变射流偏转角可以提高真空发生器的真空度,验证了改变射流偏转角提高真空发生器真空度思路的有效性。

#### 2) 不同射流偏转角的压力分布云图

图5为射流偏转角 $\theta$ 分别为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 时真空发生器的压力分布云图。比较不同射流偏转角的压力分布云图可以看到,射流偏转角 $\theta=0^\circ$ 时真空发生器的真空度低于 $\theta=30^\circ$ 和 $60^\circ$ 时的真空度,在射流的附壁混合区的中心区域压力明显高于周围的区域。相较于 $\theta=0^\circ$ ,当 $\theta=30^\circ$ 和 $60^\circ$ 时,真空腔内的真空度更高,射流在附壁曲面边界区域的压力更低,在附壁混合区的压力分布更均匀。

#### 3) 射流偏转角 $\theta$ 对真空度的影响规律仿真

仿真研究射流偏转角对真空度的影响规律。在射流缝隙宽度 $h=0.12\text{ mm}$ ,供气压力为 $0.5\text{ MPa}$ 的条件下,仿真获得 $\theta=0^\circ\sim 60^\circ$ 时真空发生器的真空度,根据仿真结果绘制真空度变化曲线,如图6所示。分析仿真结果可得改

变射流偏转角可以提高真空发生器的真空度,射流偏转角对真空度的影响规律为随着偏转角的增大,真空度先增大

后减小,在减小到一定值时真空度趋于稳定。当射流偏转角  $\theta=30^\circ$  时,真空度最高,此时  $P_v=65.1\text{ kPa}$ 。

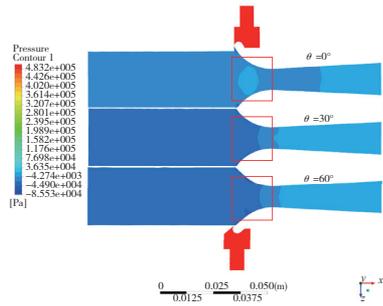


图5 不同射流偏转角的压力分布云图

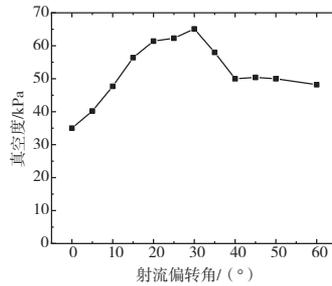


图6 不同射流偏转角下的真空度变化曲线

### 2.3 射流缝隙宽度 $h$ 对真空度的影响

1) 不同射流缝隙宽度时的速度分布云图

射流缝隙宽度是影响真空发生器真空度的关键结构参数,其对射流的速度、流量等均有影响。仿真研究射流缝隙宽度  $h$  对真空度的影响规律。图7为供气压力为0.5 MPa、射流缝隙宽度  $h=0.1\text{ mm}$  和  $0.2\text{ mm}$  时真空发生器局部速度分布云图。压缩气体从缝隙射出形成射流,射流外层卷吸的气体流速逐渐增大,射流速度逐渐较小,最终在喉部区域逐渐混合充分。当射流缝隙宽度  $h$  从

0.1 mm增大到0.2 mm后,在缝隙出口处出现了明显的射流加速效果,射流速度显著提高。

2) 射流缝隙宽度  $h$  对真空度影响规律的仿真

在射流偏转角  $\theta=30^\circ$ 、供气压力为0.5 MPa的条件下,仿真获得  $h=0.06\sim 0.20\text{ mm}$  时真空发生器的真空度变化曲线,见图8。由仿真结果可知射流缝隙宽度对真空发生器的真空度影响显著。随着射流缝隙宽度  $h$  的增大,真空发生器的真空度逐渐上升,并在  $h=0.16\text{ mm}$  时达到最大值,此时  $P_v=65.7\text{ kPa}$ 。随后真空度逐渐下降。

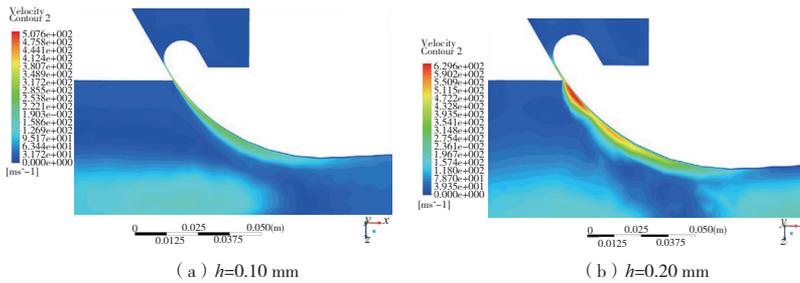


图7 不同射流缝隙宽度时局部速度分布云图

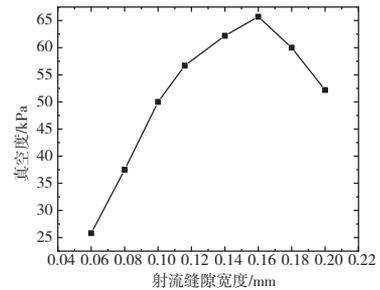
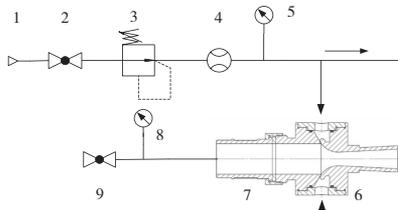


图8 不同射流缝隙下真空度变化曲线

## 3 斜射式附壁效应真空发生器的试验

### 3.1 试验平台

为了测试斜射式附壁效应真空发生器试件的工作性能,构建了测试平台,其气动回路见图9。



1—气源;2—球阀;3—减压阀;4—流量计;5—压力计;6—真空发生器;7—活接头;8—真空计;9—球阀2。

图9 试验测试气动回路图

### 3.2 关键结构参数影响规律的试验

1) 射流偏转角  $\theta$  的试验结果

对加工射流偏转角分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  的试件进行测试试验(射流缝隙宽度  $h=0.12\text{ mm}$ )。在供气压力为0.5 MPa的条件下,测试试件的真空度,根据试验结果绘制真空度变化曲线并与仿真结果进行对比,如图10所示。根据试验结果得:改变射流偏转角可以有效提高真空发生器的真空度。真空度  $P_v$  随射流偏转角  $\theta$  的增大先增大后减小。在  $\theta=30^\circ$  时达到最大值,此时  $P_v=50.3\text{ kPa}$ 。试验的真空度变化趋势与仿真的真空度变化趋势基本吻合。

2) 射流缝隙宽度  $h$  的试验结果

为研究射流缝隙宽度  $h$  对真空发生器真空度的影响,加工试件进行测试试验。根据仿真结果,  $h$  对真空度的影响显著,较小的变化就会对真空发生器的真空度产生较大影响。为了尽可能详细地测得不同  $h$  时真空发生器的真空度,同时以尽可能少的试件得到试验结果,设计加工了

种可调射流缝隙宽度的斜射式真空发生器,其结构如图 11 所示。该结构中吸入口端盖与主筒体的左端定位面是接触的,而扩散管即使在旋到头时(即扩散管附壁曲面与吸入口端盖内锥面已接触),扩散管端盖内侧面与主筒体之间仍存在一定缝隙。在此时的状态下,缝隙宽度  $h=0$ 。随后旋松扩散管,使缝隙宽度  $h$  由小到大变化。将真空发生器接入气动回路即可测得不同缝隙宽度真空发生器的真空度。

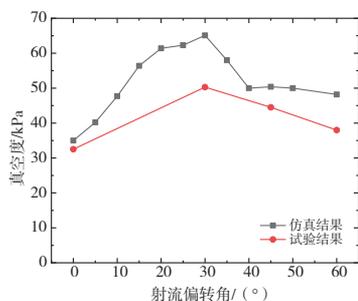


图 10 不同射流偏转角的仿真与试验真空度变化曲线

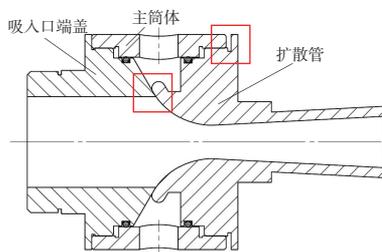


图 11 可调缝隙式真空发生器结构示意图

测试在供气压力为 0.5 MPa 时试件的真空度,根据试验结果绘制真空度变化曲线并与仿真结果对比,如图 12 所示。由试验结果得,射流缝隙宽度  $h$  对真空发生器的真空度影响规律与仿真结果基本吻合。当射流缝隙宽度  $h$  在 0.14~0.17 mm 之间时,真空发生器的真空度均达到 60 kPa;当  $h=0.161$  mm 时,真空发生器的真空度达到最大,此时  $P_v=63.2$  kPa。

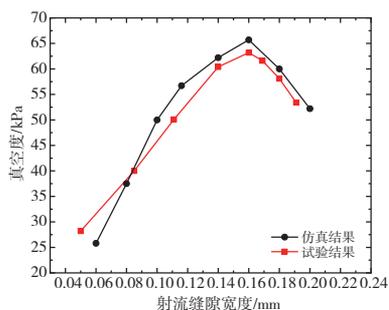


图 12 不同射流缝隙宽度的仿真与试验真空度变化曲线

### 3.3 斜射式附壁效应真空发生器的最大真空度测试

以试验结果选取最佳结构参数 ( $\theta=30^\circ$ 、 $h=0.16$  mm) 加工为斜射式附壁效应真空发生器试件,测试该试件的真

空度。图 13 为试件在供气压力为 0.1~0.6 MPa 下真空度的变化曲线。由试件结果可知随着供气压力的增大,真空发生器的真空度逐渐增大,当供气压力  $P_0=0.5$  MPa 时真空度达到最大,随后,真空度逐渐减小。斜射式附壁效应真空发生器的最大真空度  $P_{vmax}=63.8$  kPa。相较于现有的最大真空度 52 kPa,提高了 11.8 kPa。已知附壁效应真空发生器吸入口端的有效吸取直径为  $D=27$  mm,当最大真空度为 52 kPa 时,真空发生器的最大吸取力  $W=29.8$  N。斜射式附壁效应真空发生器的最大吸取力  $W=36.5$  N,最大吸取力提高约 23%。

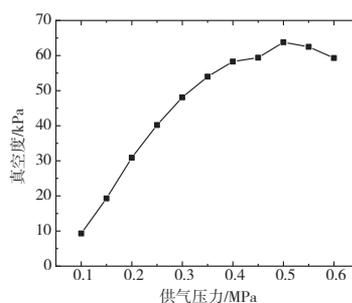


图 13 斜射式附壁效应真空发生器试件真空度变化曲线

## 4 结语

本文首次提出并实现了斜射式附壁效应真空发生器。通过仿真与试验研究了射流偏转角  $\theta$  和射流缝隙宽度  $h$  对真空度的影响规律。得出以下结论:

- 1) 改变射流方向可以有效提高附壁效应真空发生器的真空度,真空度随射流偏转角的增大先增大后减小,当射流偏转角  $\theta=30^\circ$  时真空度最大;
- 2) 射流缝隙宽度  $h$  对真空度影响显著,真空度随射流缝隙宽度的增大先增大后减小,当射流缝隙宽度  $h=0.16$  mm 左右时,真空发生器的真空度最大;
- 3) 经试验测试,当供气压力  $P_0=0.5$  MPa 时,斜射式附壁效应真空发生器的真空度最大,最大真空度  $P_{vmax}=63.8$  kPa,相较于目前的 52 kPa 提高了 11.8 kPa。

### 参考文献:

- [1] 王中医,姜鹏,李忠毅,等. 负压输送中真空发生器真空度特性分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):200-202,214.
- [2] WU F L, LI Z S. Optimisation analysis of structural parameters of an annular slot ejector based on the coanda effect [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(1):1-11.
- [3] LIEN T K, DAVIS P G G. A novel gripper for limp materials based on lateral Coanda ejectors[J]. CIRP Annals, 2008, 57(1):33-36.
- [4] KIM H D, LEE J H, SETOGUCHI T, et al. Computational analysis of a variable ejector flow[J]. Journal of Thermal Science, 2006, 15(2):140-144.
- [5] GUERRIERO V. Experimental and numerical study of Coanda ejectors for pneumatic solid transport [D]. Toulouse: INSA, 2008.
- [6] 吕苏荷,李小宁. 射流宽度和壁面曲率比值对附壁效应真空发生器性能的影响规律研究[J]. 液压与气动,2018(1):110-115.

收稿日期:2021-12-29