

# 基于回归正交试验的旋风分离器结构优化研究

李华标 吴晓明 吕智

(厦门大学 航空航天学院,福建 厦门 361000)

**摘要:**针对旋风分离器多结构参数变化,选取影响旋风分离器性能较大的4个结构参数作为优化变量:圆柱体高度 $H/D$ 、排气管直径 $d/D$ 、排气管插入深度 $h/D$ 、锥体高度 $H_c/D$ 。以回归正交试验法为实验方案,做36组仿真模拟实验。采用湍流计算的雷诺应力模型(RSM)进行气固两相流场数值模拟,并用拉格朗日法追踪固体颗粒的运动轨迹;在此基础上分别建立了旋风分离器压降和分离效率对其结构参数的回归数学模型;根据回归数学模型针对结构参数对旋风分离器的压降和分离效率的影响程度进行了分析,得出影响压降的最主要因素是升气管直径(随着升气管直径增大压降显著减小)、影响分离效率的最主要因素是升气管直径和锥体段高度。

**关键词:**旋风分离器;CFD模拟;回归正交试验法;回归模型;优化设计

**中图分类号:**TQ051.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-4801(2018)02-016-06

**DOI:**10.19508/j.cnki.1672-4801.2018.02.006

旋风分离器是一种利用离心力将固体颗粒从气固两相流体中分离出来的分离设备,因其结构简单,对环境适应性强而在工业领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。旋风分离器结构参数对其内部气流及尘粒的分离效率有重要影响,为提高旋风分离器的性能,人们采用计算流体力学(CFD)对旋风分离器的结构进行了大量研究。Stairmand<sup>[2]</sup>提出了一种优化的设计方案,即圆柱体高度和排气管直径分别为圆柱体直径的1.5倍和0.5倍。Hoekstra<sup>[3]</sup>通过对3种不同直径排气管的旋风分离器在不同流速下进行实验研究发现随着排气管直径的缩小及流速的增大,压降呈非线性增大。黄滨<sup>[4]</sup>等利用贴体网格技术,模拟得到不同排气管插入深度时的旋风分离器各向性能,得出排气管插入深度存在最优值,可保证较高的分离效率和较低的压降。Ficici F<sup>[5]</sup>对3个直径分别为 $0.235D$ ( $D$ 为圆柱体直径), $0.353D$ , $0.471D$ 的排气圆管的旋风分离器,以排气管长度、气体速度和颗粒浓度作为变量进行实验;在含尘气体流速增大时,3个旋风分离器的分离效率都会下降,而 $0.353D$ 的旋风分离器下降程度最小;认为 $0.353D$ 的排气管直径是个临界值。L.S.Brar<sup>[6]</sup>以筒体部分长度和锥体部分长度为变量,发现将筒体部分长度增加到 $5.5D$ 可以降低34%压降和提高9.5%分离效率;而如果增加锥体部分长度到 $6.5D$ ,可以降低29%压降而增加

11%分离效率。

本文讨论多结构参数变化的分离器结构优化。多个结构参数在一定范围变化时,运用回归正交设计(orthogonal regression design)试验方法,选择适合的试验点,采用计算流体力学(CFD)中湍流计算的雷诺应力模型(RSM)对各个试验点的旋风分离器两相流场进行数值模拟,并用拉格朗日法追踪固体颗粒的运动轨迹,得到压降和分离效率的模拟试验数据。根据这些模拟实验数据建立一个回归数学模型,并根据回归数学模型针对结构参数对压降和分离效率影响程度进行了分析。

## 1 几何模型和优化参数

以Stairmand旋风分离器(见图1)为优化基础模型。选取压降和分离效率作为评价指标,以获得压降小且分离效率高的旋风分离器结构。

为了确定不同旋风分离器的几何相似性(这些尺寸通常由旋风分离器的圆柱体直径 $D$ 作标准化),以7个比例尺寸 $a/D$ 、 $b/D$ 、 $H/D$ 、 $d/D$ 、 $h/D$ 、 $H_c/D$ 、 $B/D$ 来定义旋风分离器的结构参数(见表1)。

旋风分离器入口和排料口形状及尺寸保持不变,选取影响旋风分离器性能较大的4个结构参数作为优化变量:圆柱体高度 $H/D$ 、排气管直径 $d/D$ 、排气管插入深度 $h/D$ 、锥体高度 $H_c/D$ 。优化结构参数的初始尺寸和变化范围如表2所示。

作者简介:李华标(1991—),男,硕士生,从事结构优化研究。

吴晓明(1963—),男,副教授,博士,从事结构优化研究。

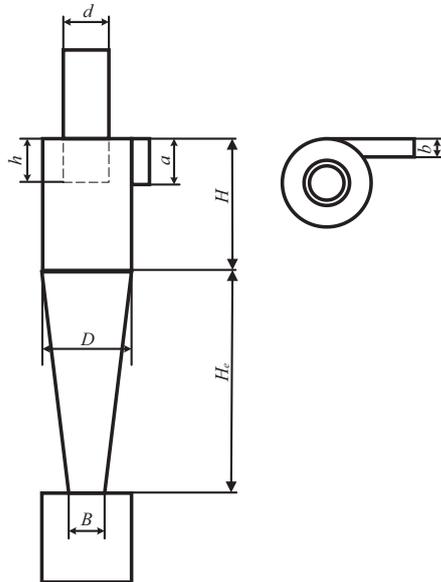


图1 Stairmand旋风分离器结构示意图

表1 Stairmand型旋风分离器基本尺寸

几何参数	数值	比例(相对于D)
进口尺寸 $a \times b / \text{mm}^2$	145×58	0.5×0.2
圆柱体直径 $D / \text{mm}$	290	1
圆柱体高度 $H / \text{mm}$	435	1.5
排气管直径 $d / \text{mm}$	145	0.5
排气管插入深度 $h / \text{mm}$	145	0.5
圆锥体高度 $H_c / \text{mm}$	725	2.5
排尘口直径 $B / \text{mm}$	107.3	0.37

表2 优化结构参数和比例变化范围

优化变量	初始比例	比例变化范围
排气管直径 $d/D$	0.5	0.3 ~ 0.7
排气管插入深度 $h/D$	0.5	0.3 ~ 0.7
圆柱体高度 $H/D$	1.5	0.9 ~ 2.1
圆锥体高度 $H_c/D$	2.5	1.5 ~ 3.5

## 2 流动模拟

旋风分离器内部气相流动为高雷诺数三维强湍流,为准确反映流场中各向异性效应,气相流场模拟选用雷诺应力模型(RSM)<sup>[7-9]</sup>,其中压力梯度项采用PRESTO!方法进行处理,压力耦合的求解基于质量、动量和能量传递方程的SIMPLEC半隐式方法,各方程对流项采用QUICK差分格式<sup>[10]</sup>。

### 2.1 控制方程

RSM输运方程:

$$u_k \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u_i' u_j'}) = D_{ij} + P_{ij} + \theta_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

式中: $D_{ij}$ 输运扩散项, $P_{ij}$ 应力产生项, $\theta_{ij}$ 压力应变项, $\varepsilon_{ij}$ 耗散项。

DPM模型(离散相模型)适用于颗粒体积分数小于10%的气固两相流动,故颗粒相的模拟计算运用DPM模型。颗粒运动在拉格朗日框架下采用随机轨道模型求解,通过力平衡计算颗粒相的运动轨迹,控制方程表示为:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \left( \frac{\rho}{\rho_p} \right) \vec{u}_p \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中: $F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$ 表示单位颗粒量的曳力; $\frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$

表示重力与浮力的合力项; $\left( \frac{\rho}{\rho_p} \right) \vec{u}_p \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_i}$ 表示各附加力的合力,包括热泳力、布朗力和Saffman升力等,在大多数情况下,这些附加力相对于黏性阻力很小,可忽略不计。由于颗粒的体积分数较小,颗粒之间的碰撞会很少,对分离效率影响较弱,故忽略了颗粒之间的相互作用。

一般对分离器的分离效率定义为:分离器的排尘口排出颗粒量与进口气流所含颗粒量之比。总分离效率表示为:

$$\eta = \frac{n_o}{n_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $n_o$ 表示排尘口处捕获的固体颗粒数, $n_i$ 表示进口口处所追踪的所有固体颗粒数。

旋风分离器内的压降是指总压降(静压和动压的总和),用旋风分离器的进出口平均全压差来表示: $\Delta P = (P_i)_i - (P_i)_o$ 本文采用无因次准数欧拉数  $Eu$  表示压降:

$$Eu = \Delta P / \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \quad (4)$$

欧拉数  $Eu$  表示分离器阻力系数,由分离器的几何参数和气体粘度共同决定<sup>[10]</sup>。

### 2.2 边界条件

入口采用速度入口;假设出口处湍流流动已达充分发展状态,所有变量在出口截面法线方向上的梯度为零,故采用OUTFLOW,对于离散相设为逃逸(ESCAPE);假设排尘口气流流量为零,对于离散相设为捕集(TRAP);壁面采用无滑移边界,采用标准壁面函数法处理边界湍流,以给出正确的壁面切应力,对于离散相设为反弹(RE-FLECT),且颗粒与壁面之间的碰撞为完全弹性碰

撞。切割粒径采用r-r分布的颗粒计算方法,颗粒直径 $0.5 \sim 6.8 \mu\text{m}$ ,平均直径 $5.97 \mu\text{m}$ 。表3是模型中旋风分离器的部分结构参数及操作条件。

表3 结构参数和操作条件

几何参数	数值	几何参数	数值
进口尺寸 $a \times b/\text{mm}^2$	145×58	粒子密度 $\rho_s/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2700
圆柱体直径 $D/\text{mm}$	290	进气速度 $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	16.1
气体密度 $\rho_g/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.225	排尘口直径 $B/\text{mm}$	107.3

### 3 回归正交实验设计和数值仿真计算结果

分别用 $X_1, X_2, X_3, X_4$ 来表示表2中所选取的优化参数排气管直径 $d/D$ 、排气管插入深度 $h/D$ 、圆柱体高度 $H/D$ 、锥体高度 $H_c/D$ 。当优化参数连续变化时,会得到无穷多种分离器组合,为此离散优化参数变量为等步长5水平变化。以方程 $X_i = (X_i - X_0)/\Delta X$ 对 $X_i$ 的5水平变化编码为-2, -1, 0, +1, +2,  $\Delta j$ 为变化步长,因素和水平见表4。

表4 二次回归试验因素和水平编码值表

水平	$X_1$ (排气管直径 $d/D$ )	$X_2$ (插入深度 $h/D$ )	$X_3$ (圆柱体高度 $H/D$ )	$X_4$ (锥体高度 $H_c/D$ )
-2	0.3	0.3	0.9	1.5
-1	0.4	0.4	1.2	2.0
0	0.5	0.5	1.5	2.5
1	0.6	0.6	1.8	3.0
2	0.7	0.7	2.1	3.5
$\Delta j$	0.1	0.1	0.3	0.5

4个优化参数变量5水平变化时,分离器的结构尺寸组合数为 $5^4=625$ 种。要对625种分离器进行数值模拟仿真,计算量非常大,为此引入正交试验设计。根据以上4因素、5水平试验样本,采用正交旋转组合设计,试验次数为36次,在FLUENT中进行36次分离器计算分离效率和欧拉数仿真实验。

以第6组试验为例:从图2—— $X=0$ 剖面上的切向速度分布云图可以看出,切向速度在轴心处接近于0。从图3—— $X=0$ 剖面上压力分布云图可以看出,剖面上压力由轴心向壁面方向不断增大,存在明显的径向梯度;这是由旋流中离心力造成的。从图4——旋风分离器内粒子的运动轨迹图可以看出,颗粒在旋风分离器中的运动状况非常复杂,且带有很大的随机性,其运动轨迹随着颗粒的进口速度、粒径的不同而不同。从图5——圆柱

和圆锥交界面上的速度矢量图可以看出,在旋风分离器内部,气流大致可分为外旋转气流和内旋转气流两个区域。

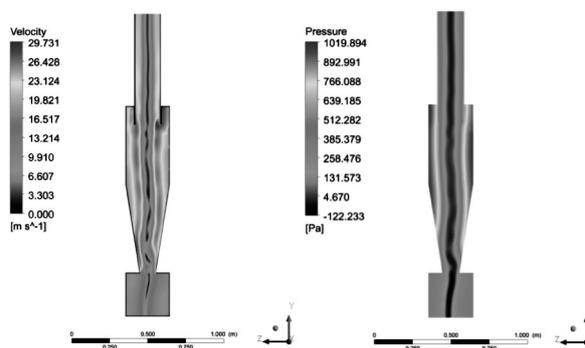


图2  $X=0$ 剖面上切向速度分布

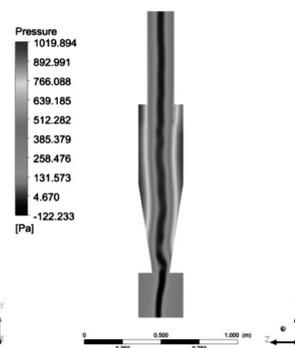


图3  $X=0$ 剖面上压力分布

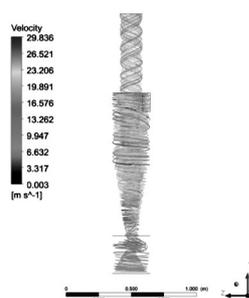


图4 粒子运动轨迹

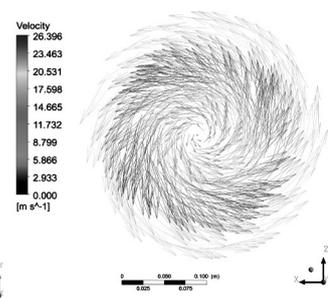


图5 圆柱和圆锥交界面上的速度矢量

### 4 回归分析与结果讨论

建立分离器性能指标分离效率和压降与优化参数变量的回归方程。本文采用三次回归方法,假设有 $m$ 个试验因素(自变量) $x_j(j=1, 2, \dots)$ ,试验指标为因变量 $y$ ,则三次回归方程的一般形式为:

$$y = c + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k} b_{ijk} x_i x_j x_k \quad (5)$$

式中, $c, \{b_i\}, \{b_{ij}\}, \{b_{ijk}\}$ 为回归系数。针对仿真试验所得到的欧拉数和分离效率数据,分别进行多元三次回归分析,构造回归方程。

#### 4.1 欧拉数 $Eu$

根据每组旋风分离器欧拉数的计算结果,运用EViews软件,保留常数项,采用逐步向后回归法拟合,剔除 $P$ 值较大的项,得到保留项的欧拉数回归系数,其结果列于表5。

从表5可以看出各项的 $P$ 值远小于0.05, $P$ 值小于0.05说明该因素影响非常显著,计算所得结

表5 欧拉数 $Eu$ 的回归系数

变量	系数	标准误差	T统计量	P值
$C$	59.45435	1.884991	31.54092	0.0000
$X_1$	-202.3100	7.891551	-25.63628	0.0000
$X_1^2$	283.6667	15.82719	17.92275	0.0000
$X_2 * X_3$	2.029475	0.603365	3.363592	0.0026
$X_1^3$	-145.4167	10.51646	-13.82753	0.0000
$X_3$	-10.16960	2.630298	-3.866329	0.0007
$X_3^2$	4.722685	1.758576	2.685516	0.0129
$X_1 * X_2 * X_3$	-3.144231	1.190755	-2.640536	0.0143
$X_1 * X_4$	2.830000	0.364301	7.768304	0.0000
$X_3^3$	-0.942901	0.389499	-2.420808	0.0234
$X_1 * X_3$	3.222115	0.850369	3.789079	0.0009
$X_4$	-1.864167	0.184563	-10.10043	0.0000

指标	数值	指标	数值
拟合度	0.998974	因变量均值	5.330694
调整后的拟合度	0.998504	因变量标准差	1.884045
回归标准差	0.072860	赤迟信息准则	-2.139347
残差平方和	0.127407	施瓦茨准则	-1.611508
拟然估计值	50.50825	汉南-奎因准则	-1.955117
F统计量	2125.357	杜宾-瓦特森统计量	1.109969
显著概率	0.000000		

果与二阶模型吻合良好。该回归方程的  $F=2125.357 > F_{0.05}(3, 27)=2.96$ , 且其显著概率为 0.00000, 回归方程拟合效果很好。在多元回归分析中, 拟合度在 0.8 ~ 1 之间可认为方程对样本的拟合较好。本研究中, 拟合度为 0.998974。根据表 5 中所列出的回归系数, 可得到欧拉数回归方程:

$$Eu = 59.45435 - 202.31 * X_1 + 283.6667 * X_1^2 + 2.029475 * X_2 * X_3 - 145.4167 * X_1^3 - 10.1696 * X_3 + 4.722685 * X_3^2 - 3.144231 * X_1 * X_2 * X_3 + 2.83 * X_1 * X_4 - 0.942901 * X_3^3 + 3.222115 * X_1 * X_3 - 1.864167 * X_4 \quad (6)$$

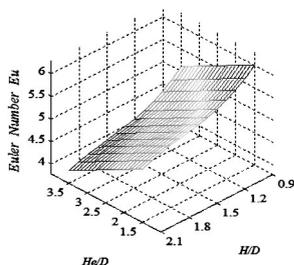


图6  $d/D=0.5, h/D=0.5$

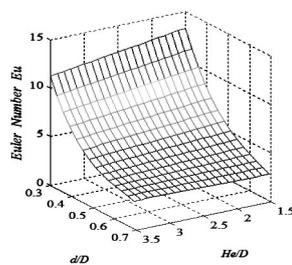


图7  $h/D=0.5, H/D=1.5$

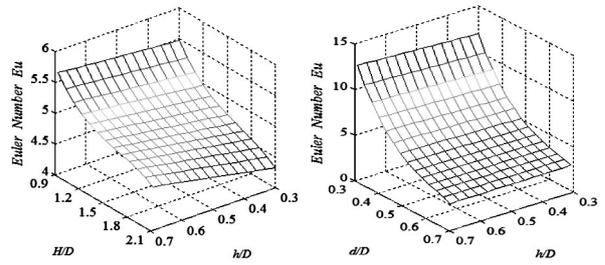


图8  $d/D=0.5, H/D=2.5$  图9  $H/D=1.5, H/D=2.5$

在 Matlab 中绘制方程 (6) 在固定两因素时欧拉数对其余两个因素的影响三维曲面图, 如图 6 ~ 9 所示。由图中可知, 升气管直径  $d/D$  和直筒段高度  $H/D$  是影响压降  $Eu$  的主要因素, 随着它们增大,  $Eu$  显著减小, 而且升气管直径  $d/D$  比直筒段高度  $H/D$  对压降的影响更大。这是由于: 气流涡旋强度是导致能量损失的主要原因, 因此升气管直径增大时, 外旋流范围变小, 漩涡强度减弱导致压降减小; 直筒段高度  $H/D$  增加时, 器壁摩擦增加导致涡旋强度减弱, 压降减小。升气管插入深度  $h/D$  和锥体高度  $He/D$  对压降的影响较小, 随着它们的增加, 压降也有相对较小的降低。这是由于: 直筒高度和锥体高度越大, 气流与桶壁之间的摩擦增大, 旋转强度降低从而使压降降低。Surmen<sup>[12]</sup> 的结论也表明这一点。由图 8 可知, 随着升气管插入深度  $h/D$  的不断增大,  $Eu$  也随之增大, 但增大的幅度较小。由图 7、9 可知, 随着升气管直径  $d/D$  的增大,  $Eu$  不断减小且变化较显著, 这是由于: 气流在器壁和旋转涡核中的摩擦损失将直接导致机械能的损失, 升气管直径越小, 外旋流范围越大, 漩涡强度越大, 则由静压转化且耗散在升气管中的动压增大, 导致压降显著增大。

#### 4.2 分离效率 $\eta$

根据每组旋风分离器分离效率  $\eta$  的仿真计算值, 在 Eviews 中运用相同的方法作回归拟合, 剔除其他  $P$  值较大的项, 得到保留项分离效率  $\eta$  的回归系数, 其结果列于表 6。

从表 6 可以看出所保留的  $P$  值均远小于 0.05, 说明这些因素的影响非常显著; 该回归方程的  $F=710.5658 > F_{0.05}(3, 27)=2.96$ , 且其显著概率为 0.00000, 可以认为建立的回归方程拟合效果很好; 拟合度为 0.998512, 方程对样本的拟合较好。根据表 6 中所列出的回归系数, 可得到分离效率的回归方程:

表6 分离效率 $\eta$ 的回归系数

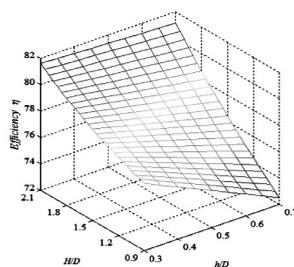
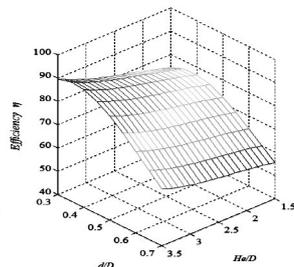
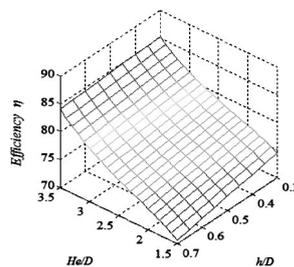
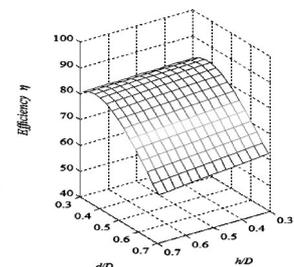
变量	系数	标准误差	T统计量	P值
$C$	-90.37020	15.44939	-5.849436	0.0000
$X_1$	479.7917	49.03882	9.783916	0.0000
$X_1^2$	29.87500	5.662515	5.275924	0.0001
$X_2 * X_3$	-10.16612	3.328510	-3.054255	0.0068
$X_1^3$	1.288333	0.392311	3.283963	0.0041
$X_3$	-88.24142	16.71855	-5.278054	0.0001
$X_3^2$	-5.667763	3.311992	-1.711286	0.1042
$X_1 * X_2 * X_3$	670.3855	49.27717	13.60438	0.0000
$X_1 * X_4$	-911.7812	73.80301	-12.35426	0.0000
$X_3^3$	23.53201	10.11803	2.325749	0.0319
$X_1 * X_3$	47.79792	8.497169	5.625158	0.0000
$X_4$	-8.696250	2.952120	-2.945764	0.0086
$C$	-64.94100	10.03113	-6.473947	0.0000
$X_1$	-146.9918	49.92765	-2.944095	0.0087
$X_1^2$	45.56617	16.86339	2.702076	0.0146
$X_2 * X_3$	0.255090	0.147805	1.725857	0.1015
$X_1^3$	24.83953	13.14430	1.889757	0.0750
$X_3$	31.54681	7.430392	4.245646	0.0005

指标	数值	指标	数值
拟合度	0.998512	因变量均值	76.63000
调整后的拟合度	0.997107	因变量标准差	6.316500
回归标准差	0.339751	赤迟信息准则	0.985645
残差平方和	2.077752	施瓦茨准则	1.777404
拟然估计值	0.258397	汉南-奎因准则	1.261990
F统计量	710.5658	杜宾-瓦特森统计量	1.780952
显著概率	0.000000		

$$\begin{aligned} \eta = & -90.3702 + 479.7917 * X_1^3 + 29.875 * X_1 * X_3 * X_4 \\ & - 10.16612 * X_3 * X_4 + 1.288333 * X_4^3 - 88.24142 * X_1 \\ & * X_3 - 5.667763 * X_2 * X_3 * X_4 + 670.3855 * X_1 \\ & - 911.7812 * X_1^2 + 23.53201 * X_1 * X_2 * X_4 + 47.79792 \\ & * X_4 - 8.69625 * X_4^2 - 64.941 * X_1 * X_4 - 146.9918 * X_1 \\ & * X_2 + 45.56617 * X_1 * X_2 * X_3 + 0.25509 * X_3^3 \\ & + 24.83953 * X_2 + 31.54681 * X_3 \end{aligned} \quad (7)$$

在 Matlab 中绘制方程(7)在固定两因素时分离效率对其余两个因素的影响三维曲面图,如图 10~13 所示。由图 10、12 可知,分离效率随着直筒段高度  $H/D$  和锥体段高度  $h/D$  的增大而增大,这是由于:旋风分离器高度增大时,尾涡旋转强度减弱而难以夹带颗粒逃逸,从而使得分离效率提

图 10  $d/D=0.5, H/D=2.5$ 图 11  $h/D=0.5, H/D=1.5$ 图 12  $d/D=0.5, H/D=1.5$ 图 13  $H/D=1.5, H/D=2.5$ 

高。由图 10、12 可知,分离效率随着升气管插入深度  $h/D$  的增加先增大后减小,这是由于:当升气管插入深度较小时,颗粒较易通过短路流直接从升气管逃逸,而当升气管插入深度过大时,颗粒难以逃逸也不易被捕集,会聚集在旋风分离器上部形“顶灰环”现象<sup>[13]</sup>造成分离效率降低;因此分离效率对升气管插入深度  $h/D$  有一个最佳值,这可以由方程(7)对变量  $X_2$  求极值得到。由图 13 可知,分离效率随着升气管直径  $d/D$  的减小而不断增大,因为:升气管直径越小,则外旋流区域增加,内旋流区域减小,颗粒难以被内旋流卷入升气管逃逸,从而使得分离效率增大;这与李昌剑<sup>[14]</sup>在研究旋风分离器分离效率时的结论一致。

## 5 结论

1) 旋风分离器的压降最主要影响因素是升气管直径,随着升气管直径增大压降显著减小;其次是直筒段高度,随着直筒段高度的增大压降也明显降低;锥体段高度和升气管插入深度影响较弱,随着锥体段高度增大和升气管插入深度减小压降缓慢降低。

2) 对旋风分离器的分离效率最主要影响因素是升气管直径和锥体段高度,随着升气管直径减小和锥体段高度的增大,分离效率显著增大;其次是直筒段高度,随着直筒段高度增大,分离效率也逐渐增大;升气管插入深度影响较弱,且其最佳插入深度与直筒段高度有密切联系,当直筒段高度较大时升气管插入深度越小效率越高。

