惠立锋. 基于 RSM 的呼吸性粉尘旋风分离器分离效能数值模拟研究[J]. 煤炭学报,2015,40(7):1692 - 1697. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1344

Hui Lifeng. Numerical analysis on the respirable dust separation efficiency of cyclone separator using response surface methodology[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(7):1692 - 1697. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1344

基于 RSM 的呼吸性粉尘旋风分离器分离效能数值模拟研究

惠立锋[1,2]

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆　400037;2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室,重庆　400039)

摘　要: 为研究满足 BMRC 曲线的呼吸性粉尘旋风分离器,利用流体力学软件 Fluent 6.3 对不同结构尺寸旋风分离器内部流场进行数值模拟,并基于响应曲面法、利用统计软件 Design - Expert 得到了呼吸性粉尘旋风分离器分离效能二次多项式预测模型。通过方差分析及回归方程系数显著性检验可知呼吸性粉尘旋风分离器筒体高度、排气管直径及插入深度对其分离效能有显著影响。根据预测模型加工旋风分离器样件并作实测验证,发现样件分离效能与 BMRC 曲线标准差为 3.16%,小于 5%。使用响应曲面法研究呼吸性粉尘旋风分离器分离效能可提高设计效率,保证计算模型可靠性,同时为满足 EN481,PM10 及 PM2.5 分离器的设计提供参考。

关键词: 呼吸性粉尘; 旋风分离器; 响应曲面法; 分离效能

中图分类号: TD714.4　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253 - 9993(2015)07 - 1692 - 06

Numerical analysis on the respirable dust separation efficiency of cyclone separator using response surface methodology

HUI Li-feng[1,2]

(1. *Chongqing Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing*　400037, *China*; 2. *State Key Lab. of Methane Disaster Monitoring & Emergency Technology, Chongqing*　400039, *China*)

Abstract: In order to study the respirable dust cyclone separator, that meet the BMRC curve, the inner flow fields of cyclone separators with various geometries were simulated by commercial computational fluid dynamics (CFD) software Fluent 6.3. Based on the response surface methodology and using the statistical software Design-Expert, the quadratic polynomial prediction model of cyclone sampling efficiency was obtained. The results show that the tube length, vortex finder diameter and vortex finder height have significant effect on the cyclone performance. The sample cyclone separator was made based on prediction model and tested, it was found that the standard deviations of cyclone separator designed by RSM and BMRC curve was 3.16% which was less than 5%. The study shows that RSM not only improves work efficiency, but also ensures the reliability of calculation model, at the same time, provides a reference for the design of separator to meet the requirements of EN481, PM10 and PM2.5.

Key words: cyclone separator; respirable dust; response surface methodology; separation efficiency

呼吸性粉尘[1]为煤矿作业场所主要职业危害因素之一,加强其质量浓度监测对煤矿粉尘防治、有效降低尘肺病发病率具有重要意义。呼吸性粉尘监测使用的关键器件为预分离器,常见的预分离器有冲击

收稿日期: 2014 - 10 - 14　　**责任编辑:** 许书阁
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1261205);重庆市自然科学基金资助项目(cstc2012jjA40023)
作者简介: 惠立锋(1986—),男,陕西富平人,助理研究员,硕士。Tel: 023 - 65239065, E - mail: huilif0530@163.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

式、陶析式和旋风式分离器。旋风分离器结构紧凑、性能稳定,尤其是可实现对粉尘质量浓度的连续采样等优点在国外大多数呼吸性粉尘采样器上得到了广泛应用[2]。分离效能作为旋风分离器性能的重要指标,决定了其适用的采样规范及适用条件。我国目前采用 BMRC 采样规范,该规范与美国的 ACGIH 及欧洲 EN481 曲线有一定差别,导致进口呼吸性粉尘旋风分离器无法在国内推广使用。调查表明,国内呼吸性粉尘采样器配备的旋风分离器分离效能很难满足 BMRC 曲线[3]。国内外研究者大多将研究重点集中在提高旋风分离器的效率上[4-8],研究尚未提及分离效能; 虽也有学者提出通过一定比例关系获取结构尺寸,但其分离效能准确性尚待测定[9]。近年来,采用计算流体力学(CFD)来研究结构参数对旋风分离器内部流场的影响,但这些研究多局限于单一结构参数,未考虑多结构参数对分离效能的综合影响[10-12]。由于影响分离效能的因素众多,考虑各因素之间的相互作用,传统试验方法次数大大增加,耗费大量的计算资源。

笔者采用 Fluent 软件对旋风分离器不同结构尺寸的流场进行数值模拟,基于响应曲面法(RSM-Response Surface Methodology),拟合出 5 种影响因子的二次多项式分离效能模型,并加工样件实测验证。该方法可准确预测呼吸性粉尘旋风分离器分离效能,为呼吸性粉尘旋风分离器结构设计提供理论指导。

1　旋风分离器的分离效能

1.1　旋风分离器结构

本文计算采用的旋风分离器几何模型如图 1 所示,其各部分尺寸分别为直筒体直径 D、高度 H、锥形筒高度 Z_c、进气口宽度 B_c、进气口高度 H_c、排气口直径 D_e、排气口插入深度 h_s 和排灰口直径 D_o。对于给定处理气量、物料质量浓度的旋风分离器,通常认为影响其分离效能的因素有 D,H,Z_c,D_e,h_s 和 D_o,通过 D 对其进行无因次化处理,为 H/D,Z_c/D,D_e/D,h_s/D 和 D_o/D。

1.2　分离效能

分离效能是指对特定空气动力学直径粒径,被旋风分离器捕集的颗粒与进入的总颗粒比值。满足 BMRC 采样规范时分离效能可用式(1)计算。

$$\eta(x) = 0.5\left(\frac{x}{x_{50}}\right)^2 \tag{1}$$

式中,x 为采样粒径,μm; x_{50} 为切割粒径,$x_{50}=5$ μm,该粒径下旋风分离器的捕集效率为 50%。

切割粒径是衡量分离效能的重要指标之一[13],

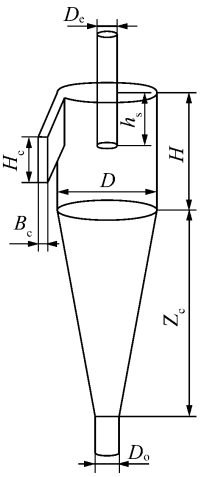


图 1　旋风分离器结构示意

Fig. 1　Sketch map of the cyclone separator

计算所有粒径对应的旋风分离器分离效能计算量过大,本文以 BMRC 采样规范 5 μm 切割粒径举例说明旋风分离器的分离效能,对其他粒径分离效能的分析这里不作赘述。切割粒径计算采用式(2)。

$$x_{50} = \sqrt{\frac{9\mu Q}{\pi h^* \rho_p v_t^2}} \tag{2}$$

式中,μ 为气体黏度,Pa·s; Q 为采样流量,m^3/s; ρ_p 为颗粒密度,kg/m^3; h^* 为旋风核心高度,$h^* = \frac{Z_c(D-D_e)}{D-D_o} + h - h_s$,m; v_t 为漩涡切向速度,$v_t = v_0 \times \left[\frac{(D_e/2)(D-B_c)\pi}{2H_cB_c\alpha + h^*(D-B_c)\lambda\pi}\right]$,m/s; v_0 为入口气速,m/s; α,λ 为无因次常量。

2　数值模型

2.1　响应曲面设计

响应曲面法[14-15]为一种数学与统计方法相结合,对目标响应受多个变量影响的问题进行建模分析来找到响应的优化值。其过程是: 首先确定可能含有最佳区域的条件,然后建立响应变量与显著因子之间的关系模型,最后利用该模型对过程进行优化,得到确认结果。

中心复合设计(CCD)[16]为响应曲面法最常用的设计方法。本文采用的五因素三水平的面中心的中心复合设计仅需 43 种不同的 CFD 模型,大大小于完全析因设计的 $3^5=243$ 种数量。不论拟合一阶、二阶或高阶回归方程,均需对其回归系数使用最小二乘法拟合,为方便起见将所有变量编码化:

$$x_i = \frac{X_i - \overline{X_i}}{(X_{iH} - X_{iL})/2} \tag{3}$$

中国科技期刊网 www.chinesaj.net

式中，$\overline{X}_i$ 为 X_i 的平均值；X_{iH} 和 X_{iL} 分别为第 i 个变量 x_i 的最大值和最小值。

表 1 给出了影响旋风分离器分离效能 5 个因素的取值范围。模型中入口颗粒速度为 0.7 m/s，空气密度为 1.225 kg/m^3，黏度为 1.81×10^{-5} Pa·s，采样颗粒密度为 1.364 4 kg/m^3。

表 1 RSM 模型中各变量及取值范围

Table 1 Variables and their ranges in RSM model

影响因素	参数名 X_i	最大值 X_{iH}	最小值 X_{iL}
D_e/D	X_1	0.75	0.3
h_s/D	X_2	1.0	0.3
H/D	X_3	2.0	1.0
Z_c/D	X_4	2.5	2.0
D_o/D	X_5	0.4	0.15

2.2 CFD 模型

(1) 网格划分：网格划分使用前处理软件。Gambit 建立旋风分离器旋风筒的结构模型，并对其进行网格划分，为保证计算精度和计算收敛，在对进气口与筒体相切处进行局部加密。

(2) 计算方法：本文选用 CFD 软件的 Fluent 6.3 对呼吸性粉尘旋风分离器的内部气固两相流进行数值模拟。呼吸性粉尘分离效能标定实验中亚甲基蓝的体积分数为 0.001 45% ~0.009 32%，满足离散相模型(DPM)对颗粒体积分数小于 10% ~12% 的规定，在动量方程中可以忽略颗粒间的碰撞。呼吸性粉尘旋风分离器气体运动速度小，温度相对稳定，气相流场计算时采用不可压缩、非稳态数学模型和标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型，非稳态湍流流场采用 SIMPLE 方式，控制方程对流相采用 QUICK 差分格式。

(3) 边界条件：旋风分离器入口采用 VELOCITY INLET，假设出口处湍流已经充分发展，采用 OUTFLOW，对离散相设为逃逸(ESCAPE)；排灰口由于密封，气流流量为 0，对于离散相设为捕集(TRAP)；旋风筒壁面、排气口壁面和排灰口端面设为 WALL，采用无滑移边界条件，对于离散相设为反弹(REFLECT)。

3 结果分析

采用响应曲面法常见的中心复合设计方法，其设计点位于一个面中心的超立方体中，由 3 部分 43 个点组成：32(2^5)个部分全部析因点；10($2k$)个每个因素原点轴向部分点；1 个中心点。表 2 为本模型中心复合设计的计算工况及其分离效能计算值。

表 2 中心复合设计的计算工况及计算值

Table 2 Calculation conditions and value of CCD

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y	序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
1	0.3	0.3	1	2	0.15	0.94	23	0.3	1	2	2	0.4	0.96
2	0.75	0.3	1	2	0.15	0.38	24	0.75	1	2	2	0.4	0.55
3	0.3	1	1	2	0.15	0.92	25	0.3	0.3	1	2.5	0.4	0.96
4	0.75	1	1	2	0.15	0.31	26	0.75	0.3	1	2.5	0.4	0.53
5	0.3	0.3	2	2	0.15	0.96	27	0.3	1	1	2.5	0.4	0.95
6	0.75	0.3	2	2	0.15	0.63	28	0.75	1	1	2.5	0.4	0.24
7	0.3	1	2	2	0.15	0.95	29	0.3	0.3	2	2.5	0.4	0.97
8	0.75	1	2	2	0.15	0.49	30	0.75	0.3	2	2.5	0.4	0.69
9	0.3	0.3	1	2.5	0.15	0.95	31	0.3	1	2	2.5	0.4	0.96
10	0.75	0.3	1	2.5	0.15	0.44	32	0.75	1	2	2.5	0.4	0.59
11	0.3	1	1	2.5	0.15	0.94	33	0.01	0.65	1.5	2.25	0.275	1
12	0.75	1	1	2.5	0.15	0.06	34	1.060	0.65	1.5	2.25	0.275	1.33
13	0.3	0.3	2	2.5	0.15	0.96	35	0.525	0.18	1.5	2.25	0.275	0.86
14	0.75	0.3	2	2.5	0.15	0.65	36	0.525	1.48	1.5	2.25	0.275	0.73
15	0.3	1	2	2.5	0.15	0.95	37	0.525	0.65	0.31	2.25	0.275	0.65
16	0.75	1	2	2.5	0.15	0.53	38	0.525	0.65	2.69	2.25	0.275	0.87
17	0.3	0.3	1	2	0.4	0.95	39	0.525	0.65	1.5	1.66	0.275	0.79
18	0.75	0.3	1	2	0.4	0.47	40	0.525	0.65	1.5	2.84	0.275	0.84
19	0.3	1	1	2	0.4	0.94	41	0.525	0.65	1.5	2.25	−0.022	0.78
20	0.75	1	1	2	0.4	0.06	42	0.525	0.65	1.5	2.25	0.572	0.87
21	0.3	0.3	2	2	0.4	0.96	43	0.525	0.65	1.5	2.25	0.275	0.82
22	0.75	0.3	2	2	0.4	0.66							

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

表 3 为本文各种模型的方差分析。表中来源项列出了可能拟合的回归模型，P 值表示特定变量对结果的影响是否显著。一般认为 $P \leqslant 0.05$ 有显著影响。由表 3 可以看出，二阶模型拟合的实验数据 $P < 0.000\ 1$，说明计算数据和模型吻合得较好。方程复相关系数 $R = 0.927\ 2$，模型试验误差较小，可以用于分析预测呼吸性粉尘旋风分离器的分离效能。

表 3　各模型方差分析比较

Table 3　Analysis of models variance

来源	预测拟合优度	矫正拟合优度	F 值	概率 P
线性模型	0.531 4	0.614 3		<0.000 1
二阶模型	0.977 2	0.954 9	11.78	<0.000 1
三阶模型	0.516 7	0.902 4	8.75	0.003 8

注: 二阶模型 $R = 0.977\ 2$，$R_{(adj)} = 0.954\ 9$。

图 2 列举了部分不同因素对目标函数 η 的响应曲面。由图 2(a) 可知，排气管直径较小时，η 随着无因次排气管插入深度 h_s/D 的增大而出现缓慢增大；当排气管直径较大时，η 随 h_s/D 的增大先增大后减小，并且 h_s/D 越大，η 变化越明显。如图 2(b) 所示，H/D 一定，η 随排气管直径 D_e/D 的增大而减小，排气管直径变大，使得内旋流区域变大，颗粒越容易通过内旋流进入排气管逃逸，从而使得分离效能升高。旋风筒高度 η 增大幅度较快，反之亦然，这表明旋风筒高度和排气管直径的交互作用对分离效能的影响显著。由图 2(c) 可发现，随着 H/D 的增大，h_s/D 对分离效能的影响变得明显，当 $H/D = 1$ 时，η 变化较为稳定。在图 2(d) 中，分离效能随着筒体高度增大而增加，但筒体直径也不是越大越好，当 $H/D = 1.2$ 左右时，分离效能达到最优值，从响应曲面图中也可以看出，随着 Z_c/D 越大，η 的增势放缓，可见 Z_c/D 对分离效能的影响很小。

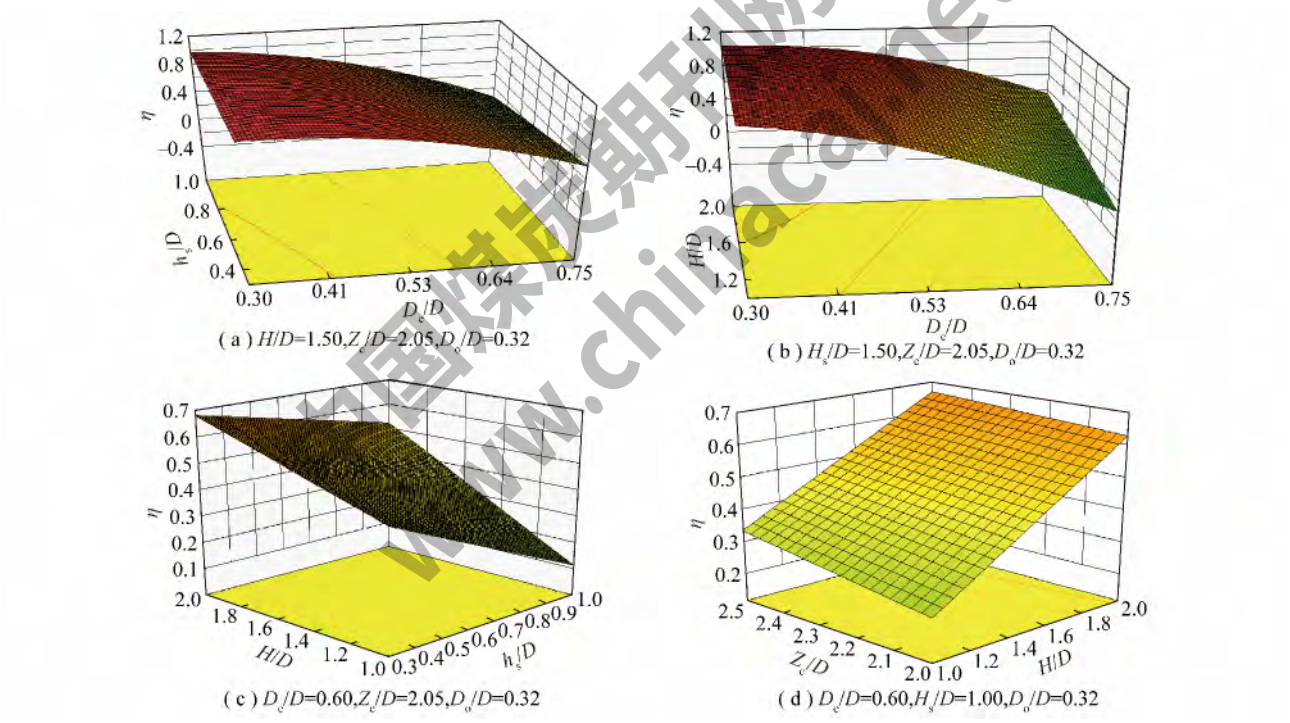


图 2　不同因素对分离效能 η 的响应面

Fig. 2　Response surfaces as a function of two different factors for sampling efficiency

《呼吸性粉尘测量仪采样效能测试方法》(MT394) 规定对呼吸性粉尘旋风分离器分离效能在采样粒径为 2.2，3.9，5，5.9 和 7.1 μm 时误差≤5% 的要求，采用 Design－Expert 对旋风分离器在该 5 个点的分离效能进行多目标响应，去掉不显著项，进行手动优化，以非编码形式表示分离效能的回归方程为

$$\eta = D_p^2(0.044\ 71 + 0.058\ 41X_1 - 0.003\ 74X_2 - 0.016\ 92X_3 - 0.036\ 05X_1X_2 + 0.032\ 48X_1X_3 + 0.010\ 28X_2X_3 - 0.135\ 34X_1^2) \quad (4)$$

式中，D_p 为测试尘的空气动力学直径。

在回归方程基础上获得优化尺寸见表 4。

表 4　结构参数优化值

Table 4　Structural parameters values of optimization

参数项	D_e/D	h_s/D	H/D	Z_c/D	D_o/D
参数值	0.59	0.99	1.05	2.05	0.17

中国知网期刊网 www.chinacaj.net

4 分离效能测试

按照表 4 所示尺寸试制 3 组呼吸性粉尘旋风分离器，样件如图 3 所示。



图 3 BMRC 旋风分离器样件

Fig. 3 Prototype of cyclone separator on BMRC

根据 MT394 要求对 3 组旋风分离器进行实验测试。实验过程确保环境温度为(20 ± 5) ℃，相对湿度 < 85% RH，供气压力小于 0.2 MPa，气溶胶发生器扩散气流为 1.5 L/min，稀释气流流量50 ~ 80 L/min，每次采样时间不少于 15 min。采样后用定量酒精将采样头滤膜、前级预捕集器和级间进行冲洗、浸泡，使用分光光度计测定冲洗溶液的浓度进而计算旋风分离器在该粒径下的分离效能。测试结果平均值与 BMRC 曲线对应值偏差见表 5。由表(5) 可知，式(4) 预测值与测试结果较为接近。根据式(5) 计算所设计旋风分离器分离效能与 BMRC 曲线标准差 $\delta = 3.16\% \leqslant 5\%$。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\eta'_i - \eta_i)^2} \tag{5}$$

式中，δ 为标准差；η'_i 旋风分离器在各粒径处的分离效能；η_i 各粒径对应 BMRC 曲线的分离效能；n 为实验粒子规格数，$n \geqslant 5$。

表 5 测试值与 BMRC 曲线对应值偏差

Table 5 Errors between testing data and BMRC curve

空气动力学直径/μm	测试值平均值/%	BMRC 曲线对应值/%	偏差/%
2.2	86.04	90	3.96
3.9	65.41	70	4.59
5.0	47.57	50	2.43
5.9	31.06	30	1.06
7.1	2.51	0	2.51

可见式(4) 可以准确地预测满足 BMRC 曲线的呼吸性粉尘旋风分离器结构尺寸。

5 结 论

(1) 采用 RSM 方法研究旋风分离器分离效能可减少试验次数，全面考察各因素及因素间的交互作用，大大提高分析效率及精度。

(2) 通过方差分析和回归方程系数显著性检验可知，旋风分离器旋风筒高度、排气管直径、排气管插入深度是影响 BMRC 旋风分离器切割粒径处分离效能的显著性因素；在一定尺寸范围内，其分离效能随着旋风筒高度增长而增加，随排气管直径及插入深度增大而减小。

(3) 对预测值 $D_e/D = 0.59$，$h_s/D = 0.99$，$H/D = 1.05$，$Z_c/D = 2.05$，$D_o/D = 0.17$ 时的旋风分离器加工测试，发现测试值与 BMRC 曲线标准差 $\delta \leqslant 5\%$，分离效能满足 BMRC 曲线要求。

(4) 该研究方法可以较好地预测呼吸性粉尘旋风分离器的分离效能，为满足 EN481，PM10 及 PM2.5 采样头的快速准确设计提供一定参考，为下一步呼吸性粉尘的连续监测提供了保障。

参考文献:

[1] 中国安全生产科学研究院. 职业病危害因素检测 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社，2012.
China Academy of Safety Science and Technology. Detection of occupation disease harm factors [M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press，2012.

[2] 霍夫曼 A C，斯坦因 L E. 旋风分离器 - 原理、设计和工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社，2004.
Alex C Hoffmann，Louis E Stein. Gas cyclones and swirl tubes，principles，design and operation [M]. Beijing: Chemistry Industry Press，2004.

[3] 孟 超，赵 敬，刘 璐. 个体采样器旋风式粉尘采样头的设计验证 [J]. 职业与健康，2010，26(5)：1110 - 1113.
Meng Chao，Zhao Jing，Liu Lu. Design verification test on cyclone sampling head of personal sampling pump [J]. Occup. and Health，2010，26(5)：1110 - 1113.

[4] Mousa Vian S M，Najafi A F. Numerical simulation of gas-liquid—solid nows in a hydro cyclone separator [J]. Archive of Applied Mechanics，2009，79(5)：395 - 405.

[5] Azadi M，Mohebbi A H. A CFD study of effect of cyclone size on its performance parameters [J]. Journal of Hazardous Materials，2010，182(6)：835 - 841.

[6] Sepehr Sadighi，Mansoor Shirvani，Mansooreh Esmaeli，et al. Improving the removal efficiency of cyclones by recycle stream [J]. Chemical Engineering & Technology，2006，10(29)：1242 - 1246.

[7] Jiao Jinyu，Zheng Ying，Sun Guogang，et al. Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone [J]. Separation and Purification Technology，2006，49：157 - 166.

[8] Bardin-Monnier N，Altmeyer S，Schreiber V，et al. Comparison of two methods of cyclones simulation: semiempiric model and CFD. Example of a specific cyclone design [J]. Asia-Pac. J. Chem. Eng.，2013，8：93 - 103.

[9] 孟 超，刘 璐. 旋风式采样头预捕集器的设计研究 [J]. 中国

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

卫生工程学,2009,4(8):68 -71.
Meng Chao,Liu Lu. Design on cyclone separator of cyclone sampling head [J]. Chinese Journal of Public Health Engineering,2009,4(8):68 -71.

[10] 孙　胜,周　昊,邱坤赞,等. 入口结构对旋风分离器分离效率的影响 [J]. 动力工程学报,2013,33(5):364 -369.
Sun Sheng,Zhou Hao,Qiu Kunzan,et al. Influence of inlet structure on separation efficiency of cyclone separators [J]. Chinese Journal of Power Engineering,2013,33(5):364 -369.

[11] 杨景轩,马　强,孙国刚. 旋风分离器排气管最佳插入深度的实验与分析 [J]. 环境工程学报,2013(7):2673 -2677.
Yang Jingxuan,Ma Qiang,Sun Guogang. Experiment and analysis of vortex finder optimum length in cyclone separator [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2013(7):2673 -2677.

[12] 钱付平,章名耀. 温度对旋风分离器分离性能影响的数值研究 [J]. 动力工程,2006(4):253 -257.
Qian Fuping,Zhang Mingyao. Numerical study of the influence of temperature on separation performance of cyclone separators [J]. Chinese Journal of Power Engineering,2006(4):253 -257.

[13] Li Changjian,Chen Xueli. Structure optimization of cyclone separator with radial-inlet based on response surface methodology [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities,2013,27(1):24 -31.

[14] Lin Y C,Chyang C S. Radial gas mixing in a fluidized bed using response surface methodology [J]. Powder Technology,2003,131(1):48 -55.

[15] Hasan D M,Salah N C,Melo D,et al. Simulation and response surface analysis for the optimization of a threephase catalytic slurry reactor [J]. Chemical Engineering and Processing,2005,44(3):335 -343.

[16] 王　晶. 基于响应曲面法的多响应稳健性参数优化方法研究 [D]. 天津: 天津大学,2009.
Wang Jing. Robust parameter optimization for multi-response using response surface methodology [D]. Tianjin: Tianjin University,2009.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net