

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107954

柱锥段结构对旋风切割器性能的影响研究^{*}

邹亚雄,任晓庆,刘伟光,刘巍,杨金凤
(青岛市计量技术研究院 青岛 266000)

摘要:针对旋风切割器设计过程中,缺少有效的切割粒径预测方法问题,本文提出了影响切割粒径变化的两个关键指标。采用 CFD 方法研究 30 L/min 流量下的旋风式切割器流场特性,通过分析圆柱段和圆锥段结构尺寸引起的切割效率、中位粒径和压降等性能的变化,并结合离心效应 ψ 和结构高度-旋风长度比 Y/l 两个关键指标,得出切割粒径受不同结构尺寸影响时的变化规律,结果与文献中的实验趋势吻合。研究表明:当结构的 $Y/l \leq 70\%$ 时,增加 Y/l 值可以提高切割性能;增加圆锥段占总高度的比值,可以在减小结构阻力的同时改善切割性能;增大旋风切割器内表面积可以起到降低结构阻力的作用。本文从两个关键指标变化的角度出发,为切割器结构设计与切割粒径的精准控制提供参考。

关键词: 旋风切割器;切割效率;数值仿真;结构参数

中图分类号: TH814 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.20

Study on the effects of cylinder and cone structures on cut cyclone performance

Zou Yaxiong, Ren Xiaoqing, Liu Weiguang, Liu Wei, Yang Jinfeng
(Qingdao Institute of Measurement Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: Aiming at the problem of lacking of effective cutting particle diameter prediction method in the cut cyclone design process, two key indexes affecting the change of cutting particle diameter are proposed in this paper. The flow field characteristics of the cut cyclone under 30 L/min volume flowrate are studied with CFD method, through analyzing the performance changes of the cutting efficiency, median particle diameter, pressure drop and etc. caused by the structural dimensions of cylinder and cone sections, considering the two key indexes of the centrifugal effect ψ and structural height to cyclone length ratio Y/l , the changing law of the structural dimensions affecting the cutting particle diameter is obtained, and the results agree with the experiment trend in the reference article. The study shows that when $Y/l \leq 70\%$, increasing Y/l can improve the cutting performance; increasing the ratio of conical section to total height can improve the cutting performance while reducing the structural resistance; increasing the inner surface area of the cut cyclone can reduce the structural resistance. Starting from studying the changes of the two key indexes, this paper provides a reference for the cut cyclone structure design and the precision control of cutting particle diameter.

Keywords: cut cyclone; cutting efficiency; numerical simulation; structure parameter

0 引言

旋风切割器在气溶胶领域具有广泛应用,其切割性能与环境监测数据的准确性密切相关。目前 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 旋风切割器市场基本被发达国家技术所垄断,因此国内厂商转向撞击式切割器的研发。尽管撞击式结构可变性更强,但在切割性能方面仍以旋风式较优。可见对

旋风切割器开展深入研究,具有重要意义。

旋风切割器和旋风分离器在原理上具有相似之处。对于性能指标而言,主要包括总分离效率、50%分离效率对应的粒径值 d_{50} 、处理风量 Q 和压降;对于结构参数而言,普遍采用 8 参数法进行设计,包括进口高度 a 、宽度 b 、排气管直径 D_e 、置入深度 S 、圆柱段直径 D_c 、高度 h_s 、圆锥段高度 h_c 、锥底直径 B ,这些参数对于旋风分离器和旋风切割器是相同的。作为颗粒离心和分离过程的主体部位,圆柱段

收稿日期: 2021-05-19 Received Date: 2021-05-19

^{*} 基金项目: 山东省重大专项(2019JZZY010419)资助

和圆锥段结构对切割性能的影响最大,因此本文侧重研究与柱、锥段相关的结构参数,即 h_s 、 h_c 和 B 。

由于参与环境污染及整治较早,欧美发达国家早在 50 年前便开始了对旋风切割器进行研究。Kenny 等^[1]通过实验,得出了 D_c 、 d_{50} 和 Q 之间的关系,并总结了 1979~2015 年间旋风切割器设计的经验公式和数学模型,验证了 VSCC (Very Sharp Cut Cyclone) 型切割器的性能^[2]。Lin 等^[3]通过加载实验,研究其对切割曲线和 d_{50} 的影响。Xiang 等^[4]通过实验,研究了锥底直径对切割曲线和压降的影响,Chuah 等^[5]使用 Fluent 对 Rongbiao Xiang 的实验对象进行仿真,计算结果与实验基本吻合。Hsu 等^[6]通过实验,研究了结构尺寸对切割曲线、压降和质量因子的影响。Hoffman 等^[7]通过实验,研究了增加圆柱段高度对分离效率的影响。Francisco 等^[8]通过大涡模拟,研究了速度场及分离效率受时间步长的影响,结果表明速度仿真精度较高,而分离效率受时间步长影响较大,且与实验具有一定差异。Wan 等^[9]对不同颗粒浓度时的分离效率进行仿真,发现网格单元数量对分离效率预测精度具有较大影响,为使仿真结果与实验接近,需要耗费极大的计算资源和周期。Kaya 等^[10]发现仿真中壁面摩擦系数对分离预测具有影响,且不同摩擦系数对应的分离曲线与实验之间偏差较大。

综上所述,鉴于可以方便、准确地得出切割曲线这一特点,当前仍以实验方式研究切割性能为主,其缺点是设备的内部速度测试困难、不便于分析内在机理,同样也无法实现提前预测的目的。期间,也有诸多学者通过仿真获得切割曲线来对比性能差异,但该方法的准确度欠佳、计算耗时长,推广实施比较困难。

因此,突破“切割曲线”这一传统的仿真预测手段,代替以精确更高、速度更快的预测方法,进而更好地指导切割器设计。为此,基于仿真技术,结合文献[6]的实验,研究柱体和锥体结构变化对切割性能产生的影响,得出通过 ψ 和 Y/l 两个指标来预测切割性能变化的可行方法,为相关设计和应用提供参考。

1 旋风分离原理与仿真方案

1.1 旋风分离原理

旋风切割器在结构出口处安装有离心泵,工作时借助泵提供的负压吸入含尘气体。其入口结构一般设计为回旋式,从而起到使气流沿器壁切向、向下旋转的作用。当气流触及底部后反弹向上,最终从排气管排出。一般颗粒密度远大于气体密度,因此旋转过程中受到的离心力更大,进而从气流中分离并沿壁面滑落至沉砂池内,实现气固分离。

在离心流场中,具有切向速度 V_θ 的颗粒在旋转半径

r 上受到的离心力 F_r 大小为:

$$F_r = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{V_\theta^2}{r} \quad (1)$$

式中: d_p 为颗粒的直径; ρ_p 为颗粒的密度; V_θ 为颗粒旋转的切向速度; r 为颗粒的旋转半径。

离心力同重力的比值定义为离心效应 ψ ^[11]:

$$\Psi = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{V_\theta^2}{r} / \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g = \frac{V_\theta^2}{gr} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度。

可见,颗粒旋转的切向速度 V_θ 越大、 r 越小,则离心效应越强烈、越有利于颗粒分离。当离心效应足够大时,即便对于几微米量级的颗粒也能够从气流中脱离出来。

1.2 几何与仿真模型

由于本文侧重研究柱、锥段的影响,因此在分析过程中设定圆柱段直径 D_c 不变,改变 h_s 、 h_c 、 B 和 θ 的尺寸 (θ 作为前三者的因变量),以此研究影响规律。为便于分析,图 1 对旋风切割器的结构参数进行说明。

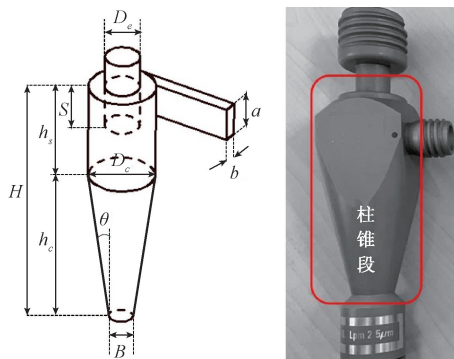


图 1 旋风切割器结构及柱锥段特征

Fig. 1 The structure and cylinder cone section feature of cut cyclone

使用 Fluent 对颗粒的气固耦合过程进行仿真。对于离散相的模拟,考虑颗粒物浓度较低,通常采用 DPM 模型对颗粒的运动轨迹进行跟踪,并使用 DWR 轨道模型修正湍流脉动的影响。对于连续相的模拟,使用 RSM 湍流模型,该模型能较好地捕捉气体强旋流特征,该方法得到了大量的实验支撑和学者认可^[9-10,12]。颗粒相密度 $\rho_p = 1\,050\text{ kg/m}^3$,气相密度 $\rho_a = 1.22\text{ kg/m}^3$ 。

风量 $Q = 30\text{ L/min}$,进口风速入口 $V_{in} = 7.7\text{ m/s}$,出口为 Outflow 边界。颗粒在进、出口边界面为 Escape 状态,采用吸附面捕捉法统计切割效率,即当颗粒运动至捕捉面时,其轨迹跟踪停止并计入到被捕集颗粒数量中。尽管也有个别学者将切割器内壁面全部按照 Reflect 壁面进行处理,通过统计出口颗粒逃逸数量的方法来计算穿透率^[13],但该方法稳定性差。本文采用的统计切割器穿透率方法如式(3)所示。

$$\eta = \frac{N_i}{N_t}$$

(3)

式中: N_i 为捕集面统计的颗粒数量; N_t 为进口入射颗粒的总数量。穿透效率即为切割效率,其与分离效率之和等于 1。根据式(1),不同粒径的颗粒所受到的离心力大小不同,其分离的程度也会出现差异,因此可以根据实验或仿真得出不同粒径对应的切割效率,从而绘制出连续的切割曲线。

网格无关性验证。采用 Fluent-Meshing 进行网格划分,网格类型为多面体,近壁面设置 5 层边界层。面单元尺度为 $0.02D_c$,体单元尺度为 $0.04D_c$,整体网格数量 30~40 万,采用瞬态模拟,时间步长为 0.001 s,控制方程的收敛标准低于 10^{-5} 。图 2 为仿真与实验的对比,其中实验曲线根据 Hsu 等^[6]的数据重新绘制。由图 2 可知,仿真与实验的趋势一致。

以穿透曲线与横坐标之间的面积(即总穿透率)统计仿真与实验之间的误差。仿真的相对误差为 20.33%,与实验差距比较明显。说明在预测颗粒穿透效率的问题上,DPM 模型仍存在精度不足的缺点。由于切割粒径通常由穿透曲线给出,后者势必影响对切割粒径变化趋势的判断,因此借助其他方法研究切割粒径的变化规律十分必要。

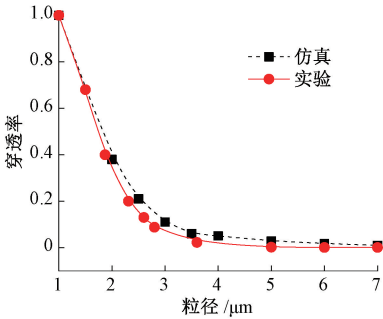


图 2 仿真与实验穿透率对比

Fig. 2 Comparison between simulation and test penetrations

1.3 参考对象分析

由上文可知,采用 DPM 仿真获取切割曲线的偏差较大,因此将该方法获得的切割曲线作为次要参考对象,用于定性描述曲线的变化趋势。将流速和压降等结果作为主要参考对象,得出可量化的规律性结论。

同时,为了研究颗粒在旋风切割器内壁面上的吸附情况,在自行搭建的装置上完成切割器测试后,笔者通过拆解旋风切割器的沉砂池结构,观察其内壁面的颗粒吸附情况,如图 3~4 所示。可以看出,少量颗粒吸附在沉砂池底,侧面和锥段底部有明显颗粒聚集。对于旋风分离器而言,当前主流仿真一般认为锥底平面是颗粒的主要吸附位置。然而在切割器上的实验表明,分离器与切

割器对颗粒的吸附区域存在一定差异。针对该问题,学界尚未形成明确结论。本文在设置颗粒捕集区域时与实验一致,即将沉砂池底面、侧面和锥底区域视为颗粒吸附面。

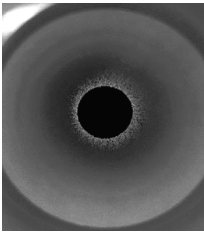


图 3 锥段内壁颗粒吸附

Fig. 3 Particle adsorption on the inner wall of cone section

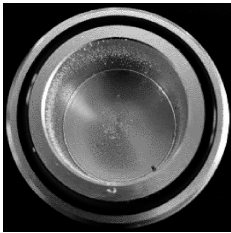


图 4 沉砂池侧底面颗粒吸附

Fig. 4 Particle adsorption on side and bottom of dust cup

切割特性反应了颗粒入射量与捕集量之间的关系,在入射量固定不变的情况下,颗粒的捕集量与流场分布密切相关。因此,流场的变化表征了切割特性的发展规律。通常对于旋风切割器的速度场和压力场而言,仿真能够给出较高精度的预测。所以,在分析切割特性随结构的变化时,以流场变化特性为主更具有说服力和科学性。

2 圆柱高度 h_s 影响分析

2.1 切割性能影响

表 1 为研究结构的尺寸,在本文中固定的结构及尺寸为: $D_c = 25\text{ mm}$, $D_e = S = a = 13\text{ mm}$, $b = 5\text{ mm}$,其中 $H = h_s + h_c$ 。在此统一说明,下文不再赘述。

表 1 h_s 结构尺寸

Table 1 Structure dimensions of h_s

结构	h_s/mm	h_c/mm	H/mm	B/mm	$\theta/(\text{^\circ})$
1	30	70	100	9	6.5
2	70		140		
3	110		180		
4	140		210		

No. 1~4 为对应结构的编号(下文与之相同)。图 5 为仿真与实验的对比,其中实验曲线根据 Hsu^[6] 的数据重新绘制。仿真在预测总穿透率时与实验之间的相对误差范围在 7.35%~30.56%,二者的变化趋势一致。切割效率曲线随 h_s 的增高发生右移, d_{50} 值依次变大。

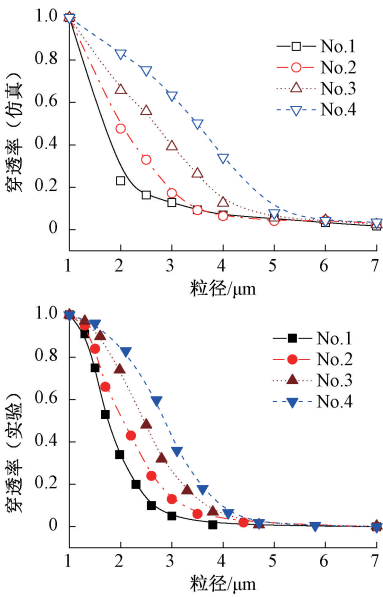


图 5 h_s 对穿透率的影响
Fig. 5 Effects of h_s on penetration

2.2 切向速度与压降分析

对比结构切向速度差异。如图 6 所示,自锥底面向上依次截取 $0.25h_c$ 、 $0.5h_c$ 、 $0.75h_c$ 、 h_c 4 个圆截面。如图 7 所示,提取截面上沿径向的切向速度,横坐标 r/R 为径向相对位置,纵坐标为切向速度。该分布与 Shukla、Wang 等得出的规律一致^[14-15],证明切向速度分析规律合理。由图 7 可知,对于同一结构,切向速度随高度位置的降低而减小;对于不同结构, h_s 越大相同高度处的切向速度越小。根据离心效应式(2),切向速度 V_θ 降低使颗粒受到的离心效应减小,导致分离效率降低、穿透效率增大,表现为切割曲线向右侧移动,中位粒径值增大。

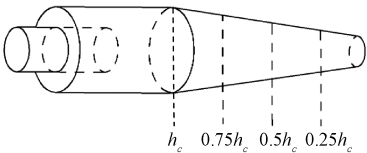


图 6 圆锥段内切向速度提取位置
Fig. 6 Extraction positions of tangential velocity in cone section

图 8 为结构压降的变化情况。横坐标 h_s 为圆柱高度,纵坐标为压降值。可见,增加 h_s 使结构的阻力下降,

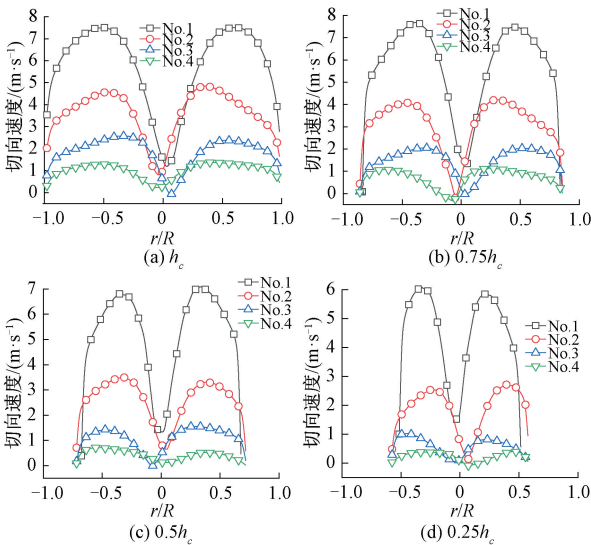


图 7 h_s 对切向速度的影响
Fig. 7 Effects of h_s on tangential velocity

但有变缓趋势。这一点与 Hoffman 的实验结论^[7]是一致的。根据 Stein 的观点^[16],增加 h_s 相当于增大器壁面积,对于流动而言等于施加了一个附加的摩擦力,从而削弱了旋涡的速度,压降随之降低,这与图 7 切向速度的变化规律吻合。

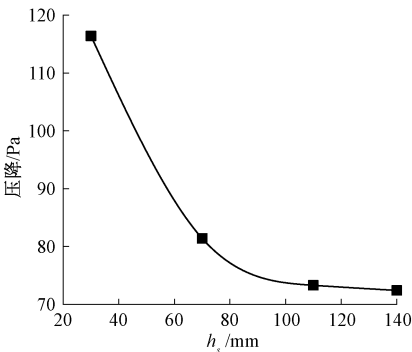


图 8 h_s 对压降的影响
Fig. 8 Effects of h_s on pressure drop

3 圆锥高度 h_c 影响分析

3.1 切割性能影响

表 2 为研究结构的尺寸。图 9 为仿真与实验的对比,其中实验曲线根据 Hsu 等^[6] 的数据重新绘制。仿真在预测总穿透率时与实验之间的相对误差范围在 8.13%~23.71%,实验与仿真的曲线趋势一致。切割效率曲线随 h_c 的增加,首先发生左移,当继续增加 h_c ,切割曲线发生右移。

表 2 h_c 结构尺寸 (θ 改变)

结构	h_s/mm	h_c/mm	H/mm	B/mm	$\theta/(\text{^\circ})$
5	40	20	60	9	21.8
6		60	100		7.6
7		100	140		4.6

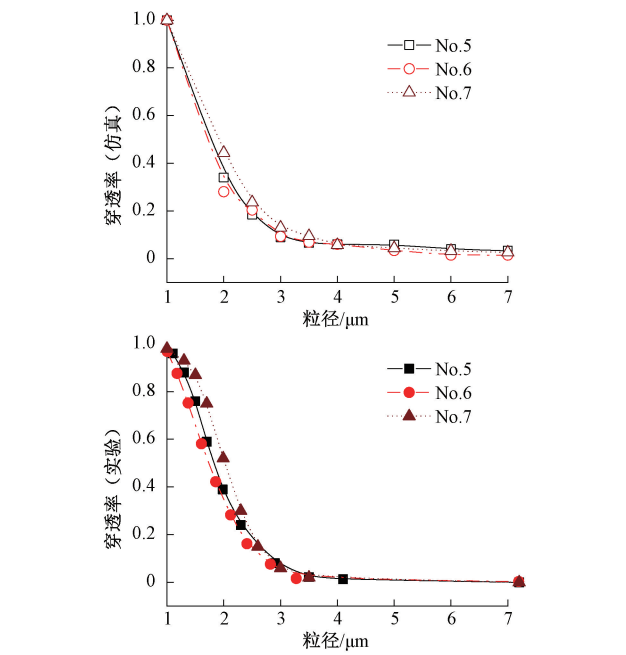


图 9 h_c 对穿透率的影响
Fig. 9 Effects of h_c on penetration

3.2 切向速度与压降分析

类似上文,取圆锥段上 4 个同比例高度面,用于提取切向速度进行对比,如图 10 所示。

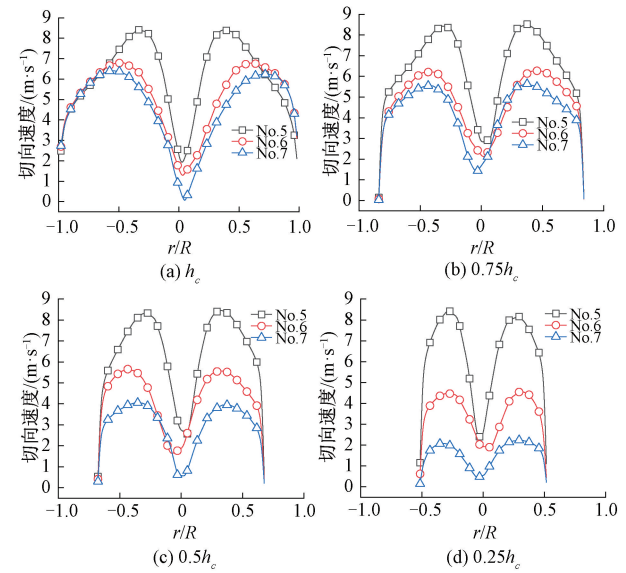


图 10 h_c 对切向速度的影响
Fig. 10 Effects of h_c on tangential velocity

可以看出, h_c 增加使切向速度持续衰减。由于 4 个截面位置各自对应的圆半径 r 相等,根据式(2),说明离心效应随 h_c 增加而减小,这与 h_s 提高后的效果一致。不同的是,此处 h_c 对切割曲线的影响存在转捩,即存在最优的圆锥段高度值,使切割效率最佳。

考虑结构变化的影响,当仅增加 h_c 时,一方面壁面积增大使附加摩擦力提升,锥段内的切向速度降低,分离效率降低;另一方面,根据旋风的发展理论, h_c 增加为自然旋风的延展提供更大空间,颗粒与壁面产生碰撞、摩擦的几率提高,可以促进颗粒分离^[17]。

由此可见,当结构尺寸发生变化时,至少要从切向速度和旋风发展两方面分别进行考虑,仅从切向速度预测切割性能的变化可能产生较大偏差。

图 11 为结构压降随 h_c 变化情况,规律与前文分析一致,即切割器展开面积增大时,结构阻力下降。

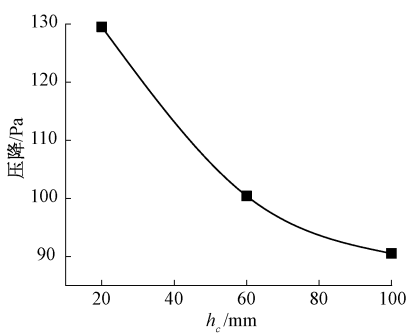


图 11 h_c 对压降的影响
Fig. 11 Effects of h_c on pressure drop

3.3 对自然旋风的分析

由上述分析可知,切向速度在预测切割特性变化时存在一定不足之处,应引入旋风的发展作为补充。

Rosin 等指出,颗粒在切割器内的旋转圈数影响分离效率,而旋转圈数又与自然旋风的长度有关。周韬等^[18]、钱付平^[19]和魏耀东等^[20]研究表明,当旋风切割器高度变化时,会影响旋风的发展程度,最终影响切割效率。Alexander^[21]定义自然旋风长度为排气管下口到旋转流结束的距离,姬忠礼等^[22]认为从排气管下口到最大切向速度衰减到 88% 的位置为自然旋风长度,杜德喜等^[23]借助湍动能计算自然旋风长度。本文采用钱付平等^[24]的方法,即通过结构尺寸、入口风速等计算旋风的长度。

表 3 对比了结构 1~7 的相关数据,其中 l 为旋风长度, Y 表示切割器排气管下口与锥底面之间的距离,可以看出:

1) 旋风长度 l 通常比切割器高度 Y 要大,与钱付平等、姬忠礼等的研究结论一致。此外,对于这 7 种结构而

言,只要在小于 70% 的范围内提高 Y/l 的大小,均有利于增大分离效率;

- 2) 当 Y 与 l 接近时,分离效率开始下降;
- 3) 当 $Y/l>1$ 时,分离效率显著降低。

关于通过 Y/l 关联切割器性能变化这一点,钱付平等在论文中并没有指出,这为量化结构尺寸与切割性能二者之间的关系,提供了数据参考。

表 3 旋风长度与结构尺寸

Table 3 Cyclone length and structure dimensions

结构	l/mm	Y/mm	$Y/l/\%$
1	125	85	68
2	130	125	96
3	131	165	126
4	130	195	150
5	116	45	39
6	125	85	68
7	130	125	96

4 圆锥比 h_c/H 的影响分析

受安装空间的影响,切割器高度 H 一般是有限的。为了实现在固定结构高度内切割器的性能最优,需要对圆锥段的高度占结构总高的比进行研究。

4.1 切割性能影响

表 4 为研究结构的尺寸。图 12 为仿真与实验的对比,其中实验曲线根据 Hsu 等^[6]的数据重新绘制。仿真在预测总穿透率时与实验之间的相对误差范围在 4.39%~33.03%,实验与仿真的曲线趋势一致。由图可见,在结构总高 H 不变的情况下, h_c/H 增大使切割曲线向左侧移动,分离效率提高了,中位粒径 d_{50} 减小。

表 4 h_c/H 结构尺寸 (θ 改变)

Table 4 Structure dimensions of h_c/H (θ changed)

结构	h_s/mm	h_c/mm	H/mm	h_c/H	B/mm	$\theta/(\circ)$
8	90	20		0.18		21.8
9	50	60	110	0.55	9	7.6
10	30	80		0.73		5.7

4.2 切向速度与压降分析

对比 $0.25h_c$ 、 $0.5h_c$ 、 $0.75h_c$ 和 h_c 4 个截面切向速度,如图 13 所示。可见随着 h_c/H 的增大,切向速度不断提高。当切割器总高度 H 不变时,提高 h_c/H 势必令圆柱段高度减少,其效果是强化了圆锥段内的切向速度。

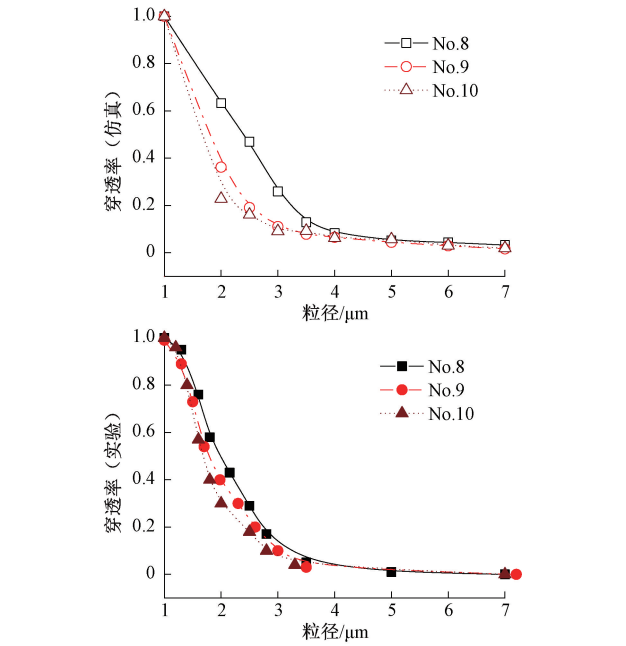


图 12 h_c/H 对穿透率的影响
Fig. 12 Effects of h_c/H on penetration

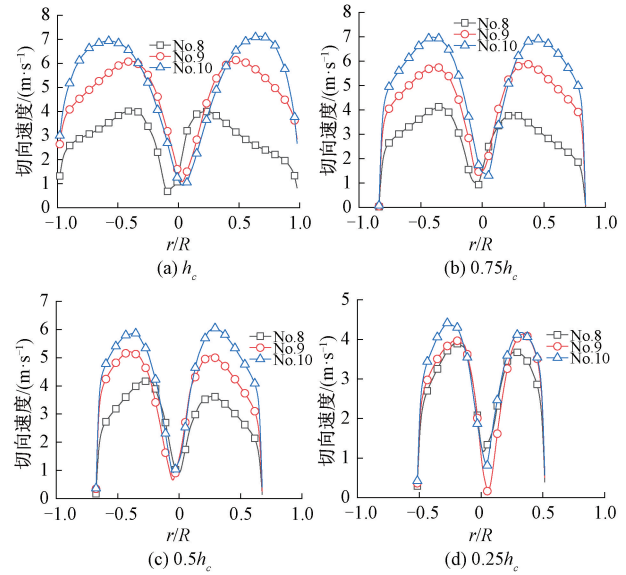


图 13 h_c/H 对切向速度的影响
Fig. 13 Effects of h_c/H on tangential velocity

图 14 为结构压降变化情况。根据前文分析,为气流提供减阻的内表面积减小了,表现为随 h_c/H 增加结构阻力不断增大。

4.3 对旋风长度的分析

计算旋风长度,对于结构 8~10, $l=127\text{ mm}$, $Y=95\text{ mm}$, $Y/l=75\%$ 。由于此时 4 种结构旋风的发展程度相同,因此,切向速度就成为反映切割曲线变化趋势的主要指标,表现在结构的切向速度增大时,分离效率提高、切割曲线左移,中位粒径 d_{50} 减小。

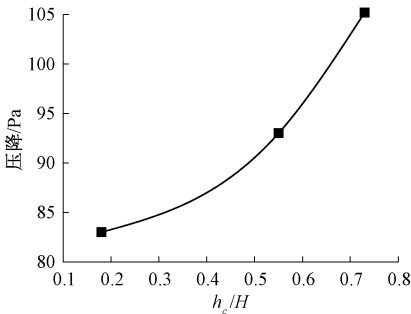


图 14 h_c/H 对压降的影响

Fig. 14 Effects of h_c/H on pressure drop

5 θ 不变, h_c 的影响分析

5.1 切割性能影响

表 5 为研究结构的尺寸。图 15 为仿真与实验的对比,其中实验曲线根据 Hsu 等^[6]的数据重新绘制。仿真在预测总穿透率时与实验之间的相对误差范围在-16.02%~4.00%,实验与仿真的曲线趋势一致。由图 15 可见, θ 不变的情况下, h_c 增大使切割曲线向左侧移动, d_{50} 值减小。

表 5 h_c 结构尺寸 (θ 不变)

Table 5 Structure dimensions of h_c (θ fixed)

结构	h_s/mm	h_c/mm	H/mm	B/mm	$\theta/(\text{^\circ})$
11		20	50	21.3	
12	30	50	80	14.8	6.5
13		80	110	9.0	

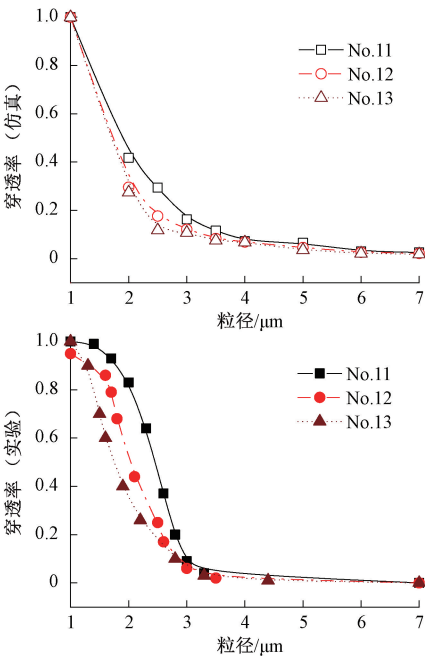


图 15 圆锥高度 h_c 对穿透率的影响 (θ 不变)

Fig. 15 Effects of h_c on penetration (θ fixed)

5.2 切向速度与压降分析

切向速度提取位置如图 16 所示,速度对比如图 17 所示。可以看出,当 θ 不变,增大 h_c 使切向速度发生衰减。对于不同结构,在 $P_1 \sim P_4$ 位置,由于相邻位置高度差异不大,切向速度变化很小。对于具有较长锥段的结构 12 和 13, P_5 和 P_6 位置的切向速度明显衰减很大。

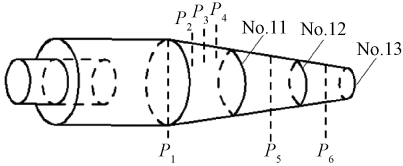


图 16 圆锥段内切向速度提取位置

Fig. 16 Extraction positions of tangential velocity in cone section

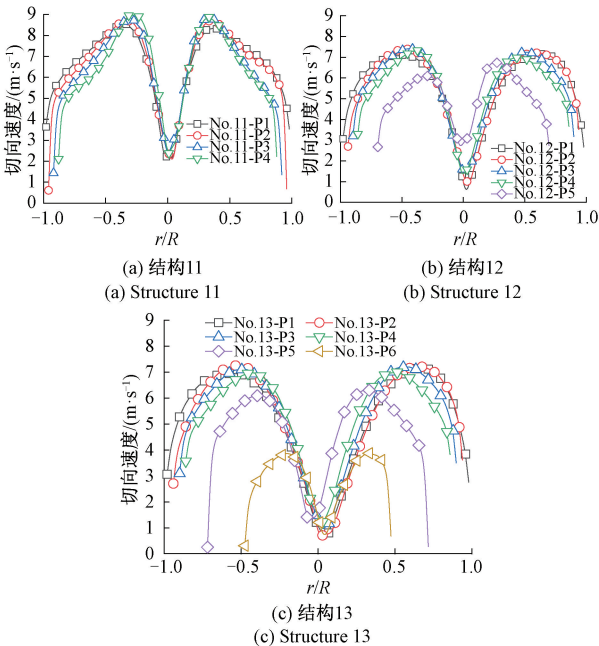


图 17 h_c 对切向速度的影响

Fig. 17 Effects of h_c on tangential velocity

结构压降如图 18 所示,规律与前文类似。

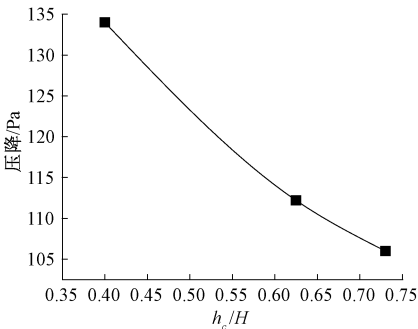


图 18 h_c 对压降的影响 (θ 不变)

Fig. 18 Effects of h_c on pressure drop (θ fixed)

5.3 对旋风长度的分析

由表 6 旋风长度可知, Y/l 值随 h_c 增加而增大。显然对于表 6 中的结构而言, Y/l 值提升对切割效率的影响大于切向速度的影响, 这与 3.3 分析结论一致。进一步说明了采用切向速度和 Y/l 值两个指标预测切割性能变化的合理性。

表 6 旋风长度与结构尺寸			
Table 6 Cyclone length and structure dimensions			
结构	l/mm	Y/mm	$Y/l/\%$
11	113	35	31
12	121	65	54
13	127	95	75

6 锥底直径 B 的影响分析

6.1 切割性能影响

表 7 所示为研究结构的尺寸。图 19 为仿真与实验的对比, 其中实验曲线根据 Hsu 等^[6]的数据重新绘制。仿真在预测总穿透率时与实验之间的相对误差范围在 2.21%~21.19%, 实验与仿真的曲线趋势一致。由图 19 可见, 切割效率曲线随 B 的增大发生右移, d_{50} 值变大。

表 7 B 结构尺寸 (θ 改变)					
Table 7 Structure dimensions of B (θ changed)					
结构	h_s/mm	h_c/mm	H/mm	B/mm	$\theta/(\circ)$
14	40	60	100	9	7.6
15				13	5.7
16				17	4.3

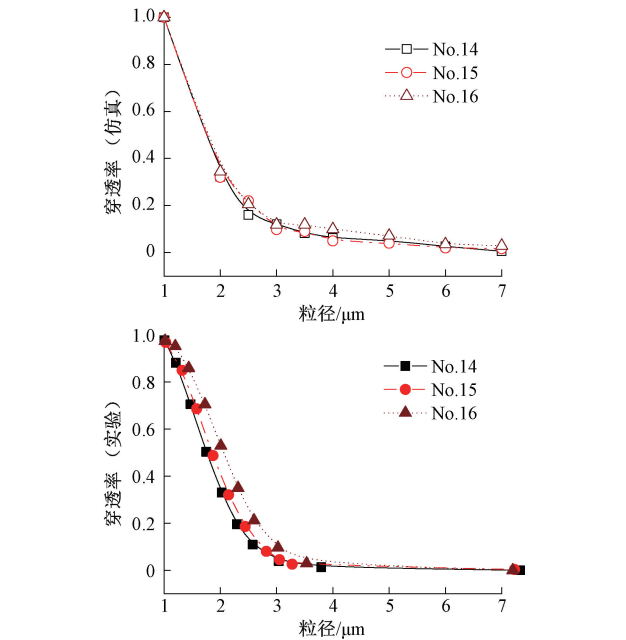


图 19 B 对穿透率的影响
Fig. 19 Effects of B on penetration

6.2 切向速度与压降分析

对比切向速度的位置与图 6 类似, 对比结果如图 20 所示。当 B 增大时, 切向速度发生衰减, 表现为切割曲线的右移。

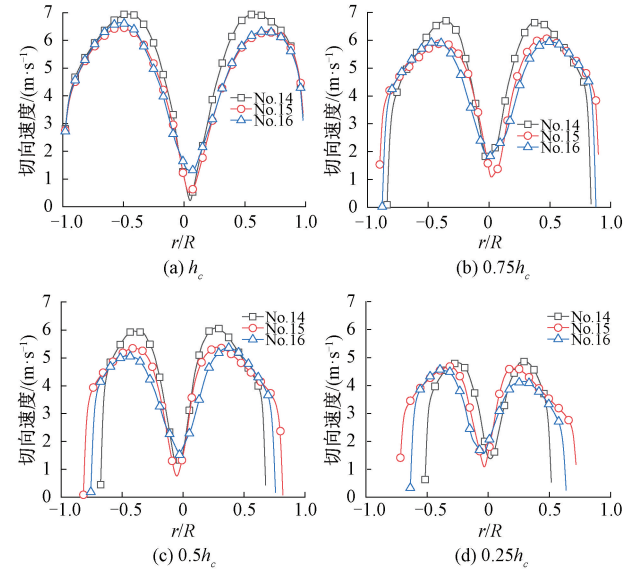


图 20 B 对切向速度的影响
Fig. 20 Effects of B on tangential velocity

结构阻力变化趋势, 如图 21 所示, 增大锥体展开面积后, 结构的压降减小。

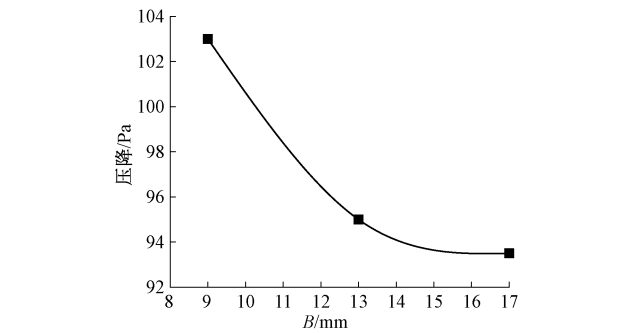


图 21 B 对压降的影响
Fig. 21 Effects of B on pressure drop

6.3 对旋风长度的分析

对于结构 14~16, $l=125\text{ mm}$, $Y=85\text{ mm}$, $Y/l=68\%$ 。与 4.3 节类似, 当结构参数和旋风长度相同时, 则由切向速度影响切割效率的变化。

7 结 论

以旋风切割器的柱锥段结构为研究对象, 通过对切向速度与旋风长度的分析, 获得了 d_{50} 的变化规律。本文

提出的方法克服了切割曲线或切向速度预测法的缺陷,主要结论如下:

1) 圆柱和圆锥段的面积之和影响切割器的阻力。增大切割器内表面积时,气流的摩擦减阻效果提高、结构阻力降低,反之阻力升高。

2) 切割曲线的变化趋势可以利用旋风切向速度 V_θ 与 Y/l 值进行预测。切向速度升高利于提高分离效率,适当增大 Y/l 值有助于旋风的充分发展,提高分离效率。 Y/l 值过大会造成锥段内切向速度衰减过快,导致切割特性变差。

3) 当结构的切向速度差异不大时,旋风长度对分离效率的影响要大于离心效应。而当 Y/l 相同时,切向速度的高低是量化切割性能优劣的关键指标。

根据上述结论,在切割器的设计过程中,可以省略 DPM 计算环节,通过流场仿真快速获取速度和旋风长度参数,从而为切割粒径的精确控制提供参考。

参考文献

- [1] KENNY L C, GUSSMAN R A. A direct approach to the design of cyclones for aerosol-monitoring applications[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2000, 31(12):1407-1420.
- [2] KENNY L C, GUSSMAN R A. Characterization and modelling of a family of cyclone aerosol pre-separators[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1995, 26(1):777-778.
- [3] LIN C W, CHEN T J, HUANG S H, et al. Effect of aerosol loading on separation performance of $PM_{2.5}$ cyclone separators [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, 18(6):1366-1374.
- [4] XLANG R B, PARK S H, LEE K W. Effects of cone dimension on cyclone performance[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32(4):549-561.
- [5] CHUAH T G, GIMBUN J, CHOONG T S Y. A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics [J]. *Powder Technology*, 2006, 162(2):126-132.
- [6] HSU C W, HUANG S H, LIN C W, et al. An experimental study on performance improvement of the stairmand cyclone design[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, 14(3):1003-1016.
- [7] HOFFMANN A C, GROOT M D, PENG W, et al. Advantages and risks in increasing cyclone separator length[J]. *AICHE Journal*, 2001, 47(11):2452-2460.
- [8] FRANCISCO J S, SALVO R D V, MARTINS D A D M. Large eddy simulation of the gas-particle flow in cyclone separators[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 94(2012):61-70.
- [9] WAN G, SUN G, XUE X, et al. Solid concentration simulation of different size particles in a cyclone separator[J]. *Powder Technology*, 2008, 183(1):94-104.
- [10] KAYA F, KARAGOZ I, AVCI A. Effects of surface roughness on the performance of tangential inlet cyclone separators[J]. *Aerosol Science & Technology*, 2011, 45(8):988-995.
- [11] 小川明. 气体中颗粒的分离[M]. 北京:化学工业出版社, 1991.
AKIVA O. Separation of particle from air and gases[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1991.
- [12] SONG C, PEI B, JIANG M, et al. Numerical analysis of forces exerted on particles in cyclone separators [J]. *Powder Technology*, 2016, 294(1):437-448.
- [13] CHIH-CHIEH C, SHENG-HSIU H. Shift of aerosol penetration in respirable cyclone samplers[J]. *AIHAJ*, 2010, 60(6):720-729.
- [14] SHUKLA S K, SHUKLA P, GHOSH P. The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(8):5774-5789.
- [15] WANG B, XU D L, CHU K W, et al. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2006, 30(11):1326-1342.
- [16] A. C. 霍夫曼, L. E. 斯坦因著, 彭维明, 等. 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.
HOFFMAN A C, STEIN L E, PENG W M, et al. Gas cyclones and swirl tubes: Principles, design and operation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [17] 岑可法. 气固分离理论及技术[M]. 浙江:浙江大学出版社, 1999.
CEN K F. Gas-solid separation theory and technology[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1999.
- [18] 周韬. 旋风分离器的气固两相特性研究与数值模拟[D]. 上海:上海交通大学, 2007.

- ZHOU T. Study and numerical simulation on gas-solid two-phase characteristic of cyclone separator [D]. Shanghai: Shanghai Jiao tong University, 2007.
- [19] 钱付平. 不同排尘结构及操作条件旋风分离器分离特性的研究[D]. 南京:东南大学, 2006.
- QIAN F P. Study on the separation characteristic of cyclone separator with different dust outlet geometries and operating conditions[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [20] 魏耀东, 张静, 宋健斐, 等. 旋风分离器自然旋风长的实验研究[J]. 热能动力工程, 2010, 25(2): 206-210.
- WEI Y D, ZHANG J, SONG J F, et al. Test study of natural cyclone length [J]. Journal of Engineer for Thermal Energy and Power, 2010, 25(2):206-210.
- [21] ALEXANDER R M. Fundamentals of cyclone design and operation [J]. Process of the Australian Institute of Minerals and Metals, 1949, 152/153:202-228.
- [22] 姬忠礼, 吴小林. 旋风分离器自然旋风长的实验研究[J]. 石油学报(石油加工), 1993, 9(4):86-91.
- JI ZH L, WU X L. Study of cyclone separator natural cyclone length[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 9(4): 86-91.
- [23] 杜德喜, 朱丽娟, 董秀奇. CFD 模拟旋风分离器自然旋风长[J]. 矿山机械, 2007, 35(4):94-95.
- DU D X, ZHU L J, DONG X Q. CFD simulation of natural cyclone length [J]. Mining Machinery, 2007, 35(4):94-95.
- [24] 钱付平, 章名耀. 基于响应曲面法旋风分离器的自然旋风长[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(2):247-251.
- QIAN F P, ZHANG M Y. Natural vortex length of cyclone separators based on response surface methodology[J]. Journal of Southeast University (Natural science edition), 2006, 36(2):247-251.

作者简介



中心的筹建、山东省重点项目的研究等工作。目前担任全国质量监管重点产品检验方法标准化技术委员会(SAC/TC 374)和全国增材制造标准化技术委员会测试方法分技术委员会(SAC/TC562/SC1)委员。

E-mail: zouyaxiong@qdimt.com

Zou Yaxiong (Corresponding author), received his B.Sc. degree in 1984 from Chongqing University, he is the vice president and a senior engineer in Qingdao Institute of Measurement Technology. His main research direction is the technical work in the field of quality, including measurement, standardization and conformity assessment, measurement technology management and aerosol measurement technology research. Now, he is leading the team to undertake the national environmental monitoring instrument industry measurement center preparation and Shandong Province key project research work. Now, he is a member of the national standardization technical committee for the examination methods of key products of quality supervision (SAC/TC 374) and the subcommittee of test methods of the national standardization technical committee for additive manufacturing (SAC/TC562/SC1).



任晓庆, 2010 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2015 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为青岛计量技术研究院工程师, 主要研究方向为流体、多相流计量技术。

E-mail: renxiaoping@qdimt.com

Ren Xiaoping received his B.Sc. degree from Liaoning Technical University in 2010 and M.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2015. He is now a engineer in Qingdao Institute of Measurement Technology. His main research direction is fluid and multi-flow metering technology.