

分级机三次风进风装置的流场研究

张胜林, 谌永祥, 李双跃

(西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 在分析传统下锥体和新型下锥体的结构与进风方式差别的基础上, 采用 Fluent 软件进行流体动力学分析, 考察 2 种结构出口环面的 z 向速度分布及内部气流运动规律。结果表明: 新型下锥体采用环状全断面进风, 使得出口环面上 z 向速度更加均匀; 蜗壳及导风叶片的作用使新型下锥体内部气流形成涡旋, 气流布满出口环面, 克服了传统下锥体速度不均匀和分选盲区的弊端; 新型下锥体具有较高的再次分选能力, 验证了模拟结果的可靠性, 为分级机进风结构的改进提供了优化方案。

关键词: 分级机; 新型下锥体; 三次风; 速度分布

中图分类号: TH44 **文献标志码:** A

文章编号: 1008-5548(2014)03-0021-04

Research on Flow Field of the Third Wind Inlet Device of Classifier

ZHANG Shenglin, CHEN Yongxiang, LI Shuangyue

(School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University
of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: On the basis of analysis on difference of structures and inlet way of traditional and new cones, the velocity distribution in direction z of the export torus and the internal flow field motion rules of the 2 devices are investigated using Fluent software to carry on fluid dynamics analysis. The results show that the new cone uses circular full face ventilation, so the speed in direction z of the export torus is even. The internal flow of new cone forms vortex and the air fills full of export torus, because of the effect of the spiral case and guide blades. The uneven export wind speed and the disadvantages of blind separation of the traditional cone are overcome. The new cone has a higher level of second classification. The reliability of simulation results is verified which provide a optimization scheme of the improvement of the classifier wind inlet structure.

Key words: classifier; new lower cone; the third wind; velocity distribution.

第三代分级机是在第一、二代分级机的基础上发展而来的涡流式分级机, 它将惯性分级技术与离心分级技术完美地结合, 分级性能较第一、二代分级机有了质的飞跃, 具有较高的分机效率、分级精度和节能

等优点。新型干法水泥生产技术的成熟与建筑行业对水泥性能的更高要求^[1-2], 对分级机的分级效率与节能水平的要求进一步提高; 另一方面, 第三代分级机本身存在以下缺陷^[3-6]: 导流叶片受应力变形导致叶片间间距不均匀, 导致叶片间风速不稳定而发生堵料; 分级问题; 物料与分散问题; 三次风分选效率低。这些缺陷都严重影响第三代分级机的效率。本文中分析一种新型三次风进风装置下锥体, 利用 Fluent 软件模拟新型下锥体出口边界 z 向速度及内部流场, 并且与传统下锥体进行对比。

1 下锥体结构的理论分析

三次风的作用是对一次分级结束后混入粗粉中的细粉再次分级, 达到提高分级机效率的目的。传统下锥体的结构如图 1(a)所示。在粗粉集料锥的内表面从上到下焊有数圈扁钢即挡料环, 挡料环用以形成料衬来减少边壁效应; 在锥体的中部设有 2 个对冲式短圆筒进风口。实际运用发现, 该下锥体分选效果并不理想, 甚至产生了负面影响, 即破坏了上部分级区的涡流规律, 降低了分级精度, 进而影响了分级效率。为了提高再次分级效率, 设计如图 1(b)所示的新型下锥体。联接法兰 1、7 分别联接新型下锥体与主分级区和风机, 联接法兰 9 联接上部锥体与蜗壳体, 联接法兰 10 联接蜗壳体与粗粉集料锥; 在蜗壳体的内部安装有若干导流叶片, 导流叶片沿圆周均匀地安装在上、下蜗壳板之间, 在水平中心线上的叶片与水平中心线的夹角为 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 其余叶片以此为基础, 与此叶片成 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 夹角沿圆周均匀分布; 2 个三次风进风口沿圆周切向分布; 内锥可以减小气流的流动空间, 增大出口气流速度, 并且具有一定的导流作用, 使气流沿着与内锥壁平行的方向流动。

2 数值模拟的建立及计算

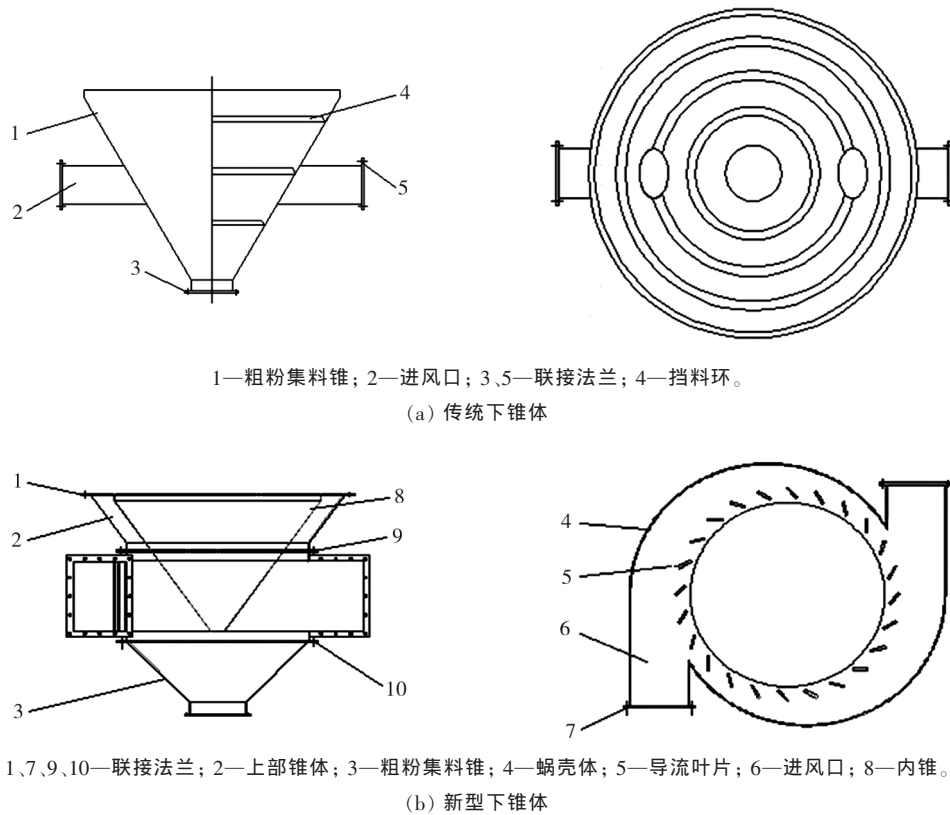
2.1 控制方程

$k-\varepsilon$ 模型是目前应用最广泛的湍流模型, 工程实践证明, 对于较复杂的湍流模型, $k-\varepsilon$ 模型在预测浮力、旋流、雷诺数等方面的影响都较准确, $k-\varepsilon$ 模型自

收稿日期: 2013-07-29, 修回日期: 2013-10-18。

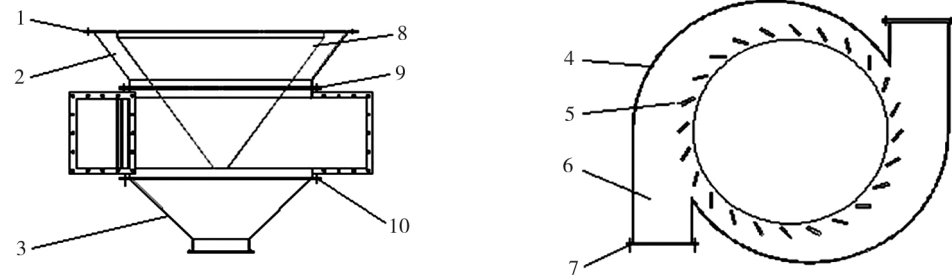
基金项目: 四川省科技厅支撑计划项目, 编号: 2010GZ0135。

第一作者简介: 张胜林(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为先进制造技术。电话: 18030980725, E-mail: 449028076@qq.com。



1—粗粉集料锥；2—进风口；3、5—联接法兰；4—挡料环。

(a) 传统下锥体



1、7、9、10—联接法兰；2—上部锥体；3—粗粉集料锥；4—蜗壳体；5—导流叶片；6—进风口；8—内锥。

(b) 新型下锥体

图 1 传统下锥体与新型下锥体结构

Fig. 1 Structure of traditional and new lower cones

从被 Launder 和 Spalding 提出之后,由于它具有经济、精度较高、适用范围广等优点,因此成为工程流场计算中的主要工具。 $k-\varepsilon$ 模型是从实验现象中总结出来的半经验的公式,包括标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、带旋流修正 $k-\varepsilon$ 模型 3 种类型。标准 $k-\varepsilon$ 模型适合大雷诺数计算;RNG $k-\varepsilon$ 提高了计算精度,涉及到了湍流漩涡;带旋流修正的 $k-\varepsilon$ 模型在强流线弯曲、漩涡和旋转有较好的表现。标准 $k-\varepsilon$ 模型的控制方程如下。连续方程为

$$\frac{\partial(\rho_g v_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial(\rho_g v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g v_i v) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x_j}) + S_{\varphi i} + S_{s i}, \quad (2)$$

湍能方程为

$$\frac{\partial(\rho_g k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g v_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

湍能耗散率为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_g \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g v_i \varepsilon) = & \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + \\ & \frac{\varepsilon}{k}(c_1 G_k - c_2 \rho_g \varepsilon), \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$S_{\varphi i} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_e \frac{\partial v_j}{\partial x_i}) + \rho_g g_i, \quad (5)$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t = \mu + c_\mu \rho_g k^2 / \varepsilon, \quad (6)$$

$$G_k = \mu_t (\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}) \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, \quad (7)$$

式中: ρ_g 为气体密度, kg/m^3 ; x_i, x_j 为直角坐标系下 i, j 方向的向量; v 为速度, m/s ; v_i, v_j 为 v 在 i, j 方向的分量, m/s ; t 为时间, s ; μ_e 为输运系数; $S_{\varphi i}$ 为气体在 i 方向自身源项; $S_{s i}$ 为动量守恒方程的广义源项; k 为湍动能, m^2/s^2 ; μ_t 为湍动黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; g_i 为直角坐标系下 i 方向的重力加速度, m/s^2 ; p 为压强, Pa ; ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; μ 为气体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; c_μ 为经验系数, 其值为 0.09; G_k 为平均速度梯度湍动能 k 的产生项; 各经验常数的取值如下: $c_\mu=0.09$; $c_1=1.42$, $c_2=1.921$, $\sigma_k=1.02$ 。由于篇幅有限, 符号推导过程详见文献^[7]。

2.2 网格模型及边界条件

模型的主要参数如下: 下锥体高均为 1 m; 出口外圆与内圆半径分别为 1.4、1.2 m; 锥体壁线与水平面夹角为 55° ; 传统下锥体的进风口半径为 0.39 m; 新型下锥体的进风口的长与宽分别为 0.3、0.4 m; 导风叶片高与长分别为 0.4、0.08 m, 叶片数为 30, 其中水平线上的叶片与水平线夹角为 45° , 其余叶片以此叶片为基准与相邻叶片夹角为 10° 。

对下锥体进行 Pro-E 建模, 将模型 Step 文件导入 Ansys 网格划分软件中划分网格, 图 2 所示为传统下锥体与新型下锥体的网格模型及边界条件设置。坐标原点取在下锥体底部圆心处, x 轴与进风口的中心线平

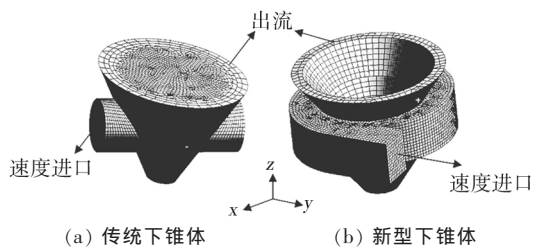


图2 下锥体网格模型与边界条件

Fig. 2 Grid model of lower cone and boundary condition

行,竖直向上为 z 轴的正方向,建立空间直角坐标系。

边界条件如下:入口风速为12 m/s;湍流强度为5%;新型下锥体内旋流是占优流动,所以选择能模拟各向异性的湍流的雷诺应力模型,传统下锥体内部流动为中等强度湍流流动,所以采用标准的 $k-\varepsilon$ 模型^[8],出口设置为自由出口。

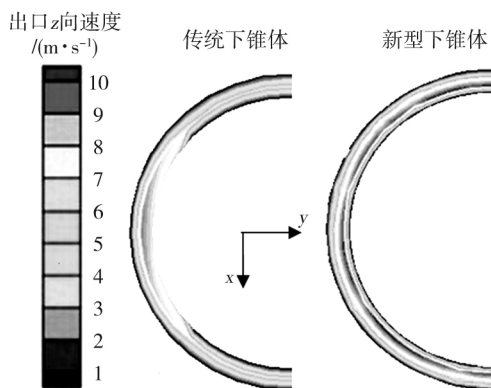
2.3 求解

把模型网格导入到Fluent 6.3求解器进行计算,求解器设置为压力基求解器、隐式和定常,其中流体黏度、密度等参数保持其默认参数^[9-10]。压力-速度耦合方程贴体曲线坐标系中非交错网格简式算法中的压力梯度项采用标准格式,计算中默认的流体为空气,即工作介质,由于速度不大,因此可以假设空气是不可压缩的^[11]。设置监视收敛性判别标准为 10^{-4} ,初始化后,设置迭代计算2 000步,即可达到较好的收敛精度。

3 模拟结果与分析

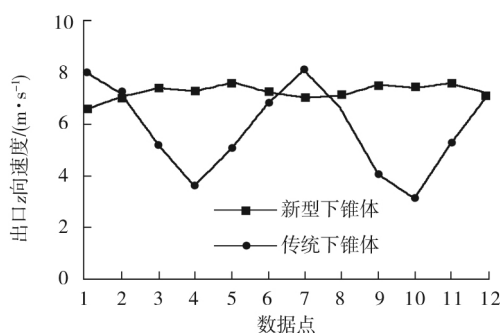
3.1 出口 z 向速度对比

图3为2种下锥体出口面 z 向速度分布云图。可以看出:传统下锥体 z 向速度沿出口环面分布不均匀,靠近 y 轴上的速度较大,靠近 x 轴上的速度较小。新型下锥体 z 向速度沿出口环面均匀分布,并且布满整个环面,边壁效应导致靠近内壁面和外壁面的 z 向速度有所减小。再次分选属于重力分选,因此 z 轴正方向上的速度起关键作用。新型下锥体出口面的 z 正

图3 下锥体出口面 z 向速度分布云图Fig. 3 Velocity distribution nephogram of outlet surface of cone in direction z

方向速度沿出口环面均匀分布,对细粉的再次分选效果较优。由于沿 x 轴附近的 z 向速度较小,因此传统下锥体对细粉的分选几乎没有效果,即存在分选盲区。

图4所示为下锥体出口面中线上 z 向速度分布,横轴上是以 x 轴为起点沿出口环面的中线每隔 30° 取的12个数据点。可以看出,新型下锥体的这些点的 z 向速度均匀分布在7 m/s附近,并且波动较小,这对细粉的分选是有利的。传统下锥体 z 向速度波动较大,范围为3~9 m/s。实践证明,速度小于5 m/s时对细粉的分选已没有明显效果。

图4 下锥体出口面中线上 z 向速度分布Fig. 4 Velocity distribution of centerline on outlet surface of cone in direction z

3.2 内部气流运动对比

为了解释2种结构出口面 z 向速度分布差异,需要对其内部气流的流动规律进行研究。图5所示为下锥体的内部速度分布。可以看出,新型下锥体采用环状全断面进风方式,蜗壳体的强制作用使三次风形成涡旋,再经过导向叶片对气流的均匀分布和内锥的引导,气流沿着内锥与外锥之间的环形区域均匀上升。气流布满整个环形出口区,克服了传统下锥体的分选盲区的弊端,有限的风量得到充分利用,提高了选粉机的效率。由于采用2个相对集中进风口进风,因此当气流从传统下锥体两侧的进风口进入下锥体后,在下锥体中发生正面碰撞,形成局部高压区。然后在转子的下底板处形成局部高压,大部分气流沿平行下底板方向向出口方向运动,所以在出口面 z 向的速度较小。由于结构的不合理,因此传统下锥体的再次分级能力很弱。

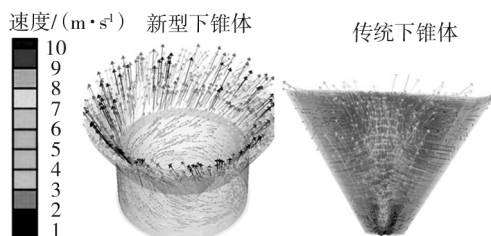


图5 下锥体内部速度矢量分布

Fig. 5 Velocity vector distribution in cone

4 工程应用

四川某水泥厂将新型下锥体应用于不同型号的分级机,记录细粉的产量并利用负压筛析仪所测粗粉筛余,并与传统下锥体进行对比,结果如表 1 所示。由表可知,由于结构更加合理,因此在运用新型下锥体后,不同型号分级机的台时产量与分级效率均比传统下锥体的有较大提高,粗粉筛余明显增大。

为了精确地分析新型下锥体的再次分选能力,在保持选粉机型号和各操作参数相同的条件下,选粉机

各项参数稳定后,分别对安装传统下锥体和新型下锥体的选粉机的回粉进行取样,利用 MS2000 型激光粒度分析仪测量回粉中的颗粒的粒径分布,结果如图 6 所示。可以看出,安装新型下锥体后,粒径为 3~30 μm 的颗粒的体积分数比安装传统下锥体的明显减小,说明新型下锥体能将回粉中更多粒径为 3~30 μm 的颗粒送回分级室。研究表明,在性能较好的水泥中,粒径为 3~30 μm 的颗粒的比例应占 65%以上。工程应用结果表明,新型下锥体对粒径为 3~30 μm 的细粉具有较高的再次分选能力,模拟的可靠性也得到验证。

表 1 新型下锥体和传统下锥体应用对比

Tab. 1 Contrast of application results of new lower cone and traditional cone

分级机型号	台时产量/(t·h ⁻¹)		粗粉筛余(30 μm 方孔筛)/%		分级效率/%	
	新型下锥体	传统下锥体	新型下锥体	传统下锥体	新型下锥体	传统下锥体
N1000	48	45.0	89.5	82	55	65
N2000	83	75.0	91.0	86	61	73
K3000	135	122.0	93.0	80	55	70
N3500	165	147.5	90.5	75	43	67

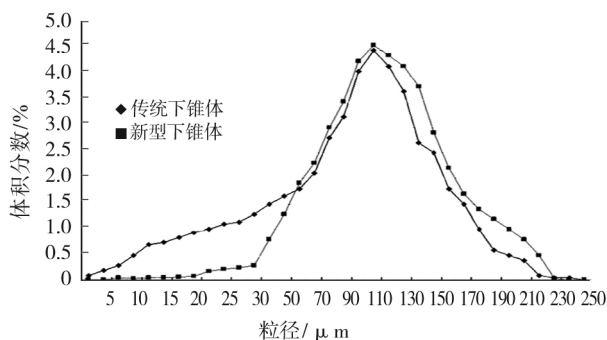


图 6 回粉颗粒粒径分布

Fig. 6 Particle size distribution of back powders

5 结论

1)对新型下锥体与传统下锥体的内部流场进行模拟,得到出口环面上 z 向的气流速度分布。由于采用沿环面全断面通风形式,因此新型下锥体 z 向气流速度沿出口环面均匀分布,克服了传统下锥体的分选盲区的弊端,使有限的风量得到充分利用,三次风利用效率明显提高,达到了明显提高分级机效率的目的,对实际生产具有一定的参考价值。

2)新型下锥体具有较强的再次分选能力,工程应用结果验证了模拟结果的可靠性,为分级机进风结构

的改进提供了优化方案。

参考文献 (References):

- [1] 李洪, 李双跃, 刘继光. 干式分级机分类与设计概论[J]. 装备导向, 2006 (2): 63-66.
- [2] 孔祥忠. 中国立窑水泥厂粉磨系统的技术改造任务[J]. 山东建材, 2003, 24 (1): 23-26.
- [3] 赵孝昆. 分级机评价方法现存问题的探讨[J]. 新世纪水泥导报, 2003, (6): 26-28.
- [4] 孙小明. O-Sepa 选粉机的合理配风[J]. 机械装备, 2010 (3): 50-51.
- [5] 李洪, 李双跃, 张德勇. O-Sepa 型涡流选粉机结构特点与改进设计[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2007, 20 (1): 15-19.
- [6] 暴海军, 李双跃, 任朝富, 等. SMG 生料选粉机的设计与实验研究[J]. 机械设计与制造, 2011 (8): 4-6.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 113-123.
- [8] 黄亿辉, 姜大志. O-Sepa 选粉机内三维流场的数值模拟[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2010, 9 (6): 666-670.
- [9] 于勇, 张俊明, 姜连田. Fluent 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 15-18.
- [10] 李进良, 李承曦, 胡仁喜, 等. Fluent 6.3 流场分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 58-63.
- [11] HAIDER A, LEVENSPIEL O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles [J]. Powder Technology, 1989, 58 (1): 64-67.