

循环流化床旋风分离器改造设计

刘云峰

(华电郑州机械设计研究院有限公司, 郑州 450046)

摘要:利用 Gambit 软件建立了旋风分离器的模型,对旋风分离器模型进行网格生成。运用数值模拟技术分别对旋风分离器内部的气相流场和气固两相流场进行模拟,观察数值模拟的结果发现,气体进入旋风分离器后速度先增大后减小,之后围绕旋风分离器外部向下运动,运动到旋风分离器底部之后开始沿着相同方向向上运动。此外,旋风分离器内小直径颗粒比大直径颗粒湍动度更大,运动的混乱程度更大,同时分离的难度也在增加。

关键词:旋风分离器;数值模拟;气固两相流;分离效率

中图分类号:TK 229 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2017)11 - 0022 - 04

1 研究背景及意义

旋风分离器是利用离心力分离气流中固体颗粒或液滴的机械设备,由于它具有结构简单、维护方便、制造安装投资费用少、耐高压高温、分离效率高优点已经被广泛地应用到环保、石油、冶金、煤电等众多领域^[1]。

近年来,随着技术的发展和人类社会的进步,人们也越来越重视环境保护,旋风分离器等除尘设备逐步发展,在消除大气粉尘污染,保护人体健康和维护生态稳定等方面发挥着极大的作用。

2 旋风分离器基本结构与工作原理

普通旋风分离器的结构简图如图 1 所示,一般都是由筒体、进气管、圆锥体、中心筒及排灰口组成。

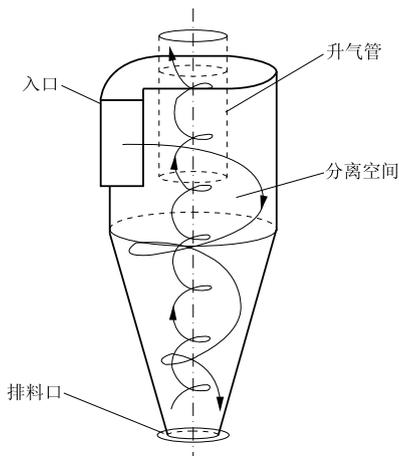


图 1 旋风分离器结构

含有粉尘颗粒的气体从旋风分离器进口进入旋风分离器后,气体会因为结构的限制导致运动轨迹

改变。当气体进入到旋风分离器的圆柱段后,因为具有一定的初速度,并且圆柱段为圆形,气体会由初速度和圆柱面的限制做圆周运动。气体做贴壁旋转运动时,气体中的粉尘颗粒受到离心力的作用运动到旋风分离器器壁,从而失去之前运动时所拥有的能量,会因旋风分离器的结构被分离排出。当向下运动的气流运动到旋风分离器的底部后,会因受力的原因向旋风分离器中心靠拢,向旋风分离器顶部运动。因为固体颗粒和气体为无滑移运动,所以部分颗粒也会伴随着气流向上运动,导致一部分颗粒从排气管逃逸,使粉尘颗粒不能从旋风分离器的排灰口被分离出来^[2]。

3 旋风分离器内气相流场的数值模拟

旋风分离器内部是复杂的气固两相流场,但是如果直接对旋风分离器内部的固体颗粒进行模拟会比较困难和抽象。所以先对旋风分离器内部的气相流场进行模拟,理解旋风分离器内气体的流动状态对理解旋风分离器的工作过程以及内部流场有很大的帮助。当了解旋风分离器内气体的流动情况,也就可以知道旋风分离器的结构对气体流动的影响,从而通过一系列的分析探索,这样就可以对旋风分离器的结构做相对应的改善,通过提高气相流场的一系列条件的稳定性调高旋风分离器的分离效率。

3.1 几何模型的建立与网格的划分

利用 Gambit 软件对旋风分离器进行建模,首先建立了旋风分离器的下部锥体段,然后是旋风分离器的上部筒体段,对两者进行合并,之后又建立中心筒筒体段,对两者进行处理组合,最后建立的是旋风分离器的进气段,对进气段和已建立好的模型进行处理合并,最后旋风分离器的整个模型建立完成。

此时,包含两个体,一个是中心筒,另一个是包含进气管在内的筒体灰斗组合体。

要使用 FLUENT 软件进行数值模拟,必须对模型进行网格的划分。网格划分的质量直接影响计算结果的准确性和收敛性,如果网格过多会导致后期计算速度降低,计算时间增长,同时占用的存储空间也会较大。

为了提高计算精度,保证网格的质量,对旋风分离器采用了分区生成网格的方法,把整个旋风分离器模型分成了 4 个部分:筒体的下半部分和灰斗、筒体的上半部分、进气管道、中心筒。旋风分离器共划分为 88 958 个网格,276 788 个面,96 892 个节点。

3.2 计算模型的选择及边界条件的设定

FLUENT 选择三维单精度求解方式,气体在旋风分离器内流动为不可压缩流动,选择压力求解器,采用默认的隐式定常流求解方式,并且设置为湍流为主。

仅对旋风分离器内的气体流场进行数值模拟,探索未携带粉尘的气体在旋风分离器内部的运动状态以及运动规律,所以旋风分离器流场里面介质只有空气,同时也忽略温度等效果的影响。空气的物性参数见表 1。

表 1 空气物性参数表

材料名称	温度/℃	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
空气	20	1.225	1.7894

由于只研究旋风分离器内气相的流动,关于边界条件设置很方便。在划分网格时已经对旋风分离器的各个边界进行了设置,这里只需要对各个边界条件稍作调整:(1)进气管为速度进口,设置进口速度大小为 30 m/s;(2)灰斗捕集口为自由出流,设置流量为 0(这里设置为自由出流是为气固两相流模拟做铺垫的,出口流量设置为 0 是相当于壁面的);(3)中心筒出口为自由出流设置流量为 1;(4)使旋风分离器筒体与出气筒相连,形成了通流;(5)其余各面均设置为无滑移壁面。

因为旋风分离器内部气体流场的运动状态为湍流状态,这就需要通过规定旋风分离器进口的条件来约束及确定湍流状态。

3.3 设置求解控制参数

完成了旋风分离器模型的建立、网格的生成、计算方法的选用以及各个进出口边界条件的约束等工作,之后需要选择离散格式、设置欠松弛因子等条件,就可以使用 FLUENT 自带的求解器对旋风分离器模型进行计算求解了。

我们对旋风分离器划分网格时采用的六面体网

格,耦合方程和动量方程之间速度压力产值格式选择速度压力产值格式(PRESTO)格式。求解器中其他参数不做改变,保持默认即可,设置迭代步数为 3 000,开始对旋风分离器模型进行计算。

4 数值模拟结果分析

通过数值模拟可以观察到旋风分离器内各个平面内的流动情况,如图 2 所示。旋风分离器在锥体段的速度分布云图为一个一个圆环,在同一个圆环上速度相等,圆环分布相间距离在外部距离大说明速度梯度较小,在中间部分圆环之间距离小说明在旋风分离器中间部分速度梯度较大。通过看速度分布云图和计算结果可以看出气流在旋风分离器后速度先增大,在中心筒附近达到最大。由图 2 可看出在旋风分离器下部中心轴线处速度较低,在中心轴线到旋风分离器器壁之间速度逐渐增高。

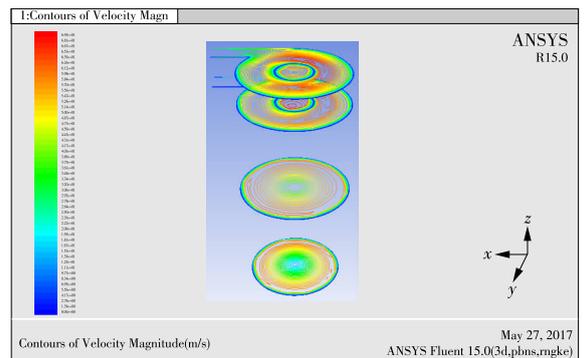


图 2 不同高度截面上的速度等值线

图 3 所示箭头方向为气体运动方向,当气体进入旋风分离器后因为受到旋风分离器结构的约束,箭头方向偏向下,说明气体除了做圆周运动以外还有偏向下的分速度。另外通过速度矢量图可以知道旋风分离器中心处的提起箭头方向与外部箭头方向相同,说明内部气流旋转方向与外部气流旋转方向相同,只不过内部气流有竖直向上的分速度,与外部气流相反,并且随着截面高度的增加,向上运动的速度分量越大,其中中心筒进口速度最大。

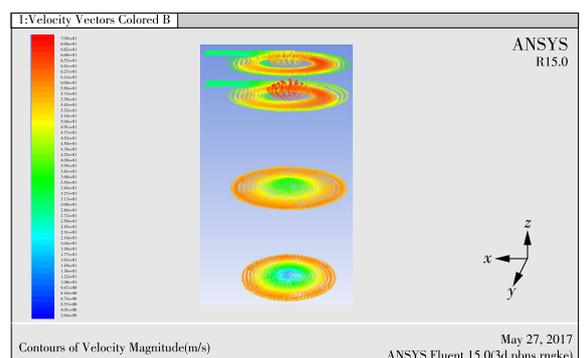


图 3 不同高度横截面上的速度矢量

速度分布图中有许多小圆圈的存在,如图 4 所示。这是旋风分离器内部存在的二次涡,其中最主要的二次涡发生在旋风分离器器壁附近,此涡会把部分附着在旋风分离器器壁上的颗粒带到旋风分离器上部为使其无法分离,另外可以看到 $y=0$ 截面图中中间部分速度有“摆尾”现象。

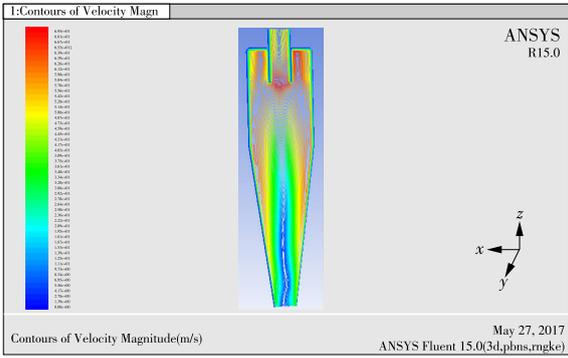


图 4 $y=0$ 截面速度

4.1 轴向速度分布

如图 5 所示,在 0 m 处左右两侧轴向速度相等。在 0.4 m 处轴向速度为零,并且轴向速度大部分为正值,而有一小部分为负值。其中在左右 0.4 m 两侧为下行流,而在左右 0.4 m 之间为上行流。从图中可以直观地看出上行流被左右两侧的下行流包围,这也是旋风分离器内部存在二次流的原因。另外可以看出轴向速度在靠近旋风分离器中心上部达到最大值。

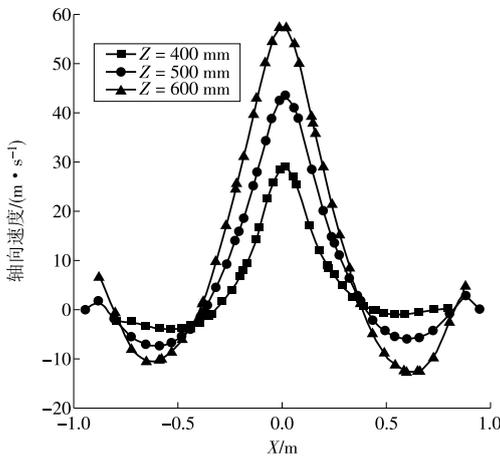


图 5 $Y=0$ 轴向速度分布

4.2 径向速度分布

如图 6 所示,径向速度以中心线为分界线,左侧为正,右侧为负。径向速度的最大值出现在中心筒和刚进入下部锥体的部位。当径向速度较大时,粉尘颗粒受到的干扰也会增大,可能会导致粉尘颗粒进入内旋流区域,降低旋风分离器的分离效率。而且在图中可以发现,径向速度除了在中心轴线附近成对出现之外,在其他部位的径向速度接近于零,这

说明处径向速度在旋风分离器的其他部位运动并不明显。由于上文说出有气流短路现象,此现象是因为中心筒的限制导致径向速度变化剧烈产生的。

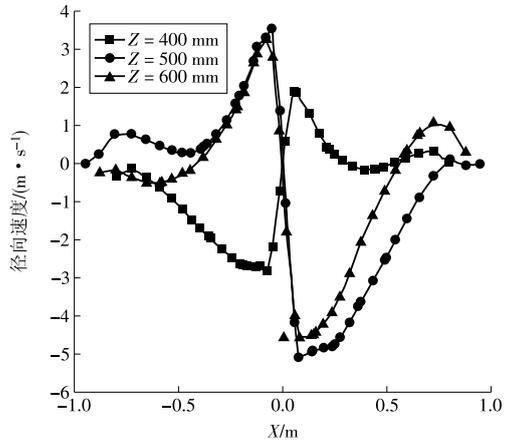


图 6 $Y=0$ 径向速度分布

4.3 流场的湍流结构

旋风分离器内部流场是强旋转湍流流场,湍流流体的流动很不规律,雷诺数较大,湍动度很大,这样会使流体的能量损失增大。因为旋风分离器内部流场较混乱,会使流动产生很多阻力,通过数值模拟可以观察旋风分离器各个部位所对应的能量损失,会对旋风分离器的改造提供一些信息。

4.3.1 湍动能

湍动能是指在湍流流动中单位质量流体由于湍流脉动所获得的能量,是通过雷诺应力做功获得能量的。

如图 7 所示,在同一水平截面中从中心向外处湍动能先增大再减小。在 0.3 m 处湍动能变到最大,最大值为 $160 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。之后开始减小,到器壁处减到最小值,不同截面的最小值不同。另外从图中可以看出,在中心区域湍动能变化较快,导致这个区域内能量损失加大。可以看出在壁面处湍动能变化幅度比较小,这个区域内气流损失的能量也就少。

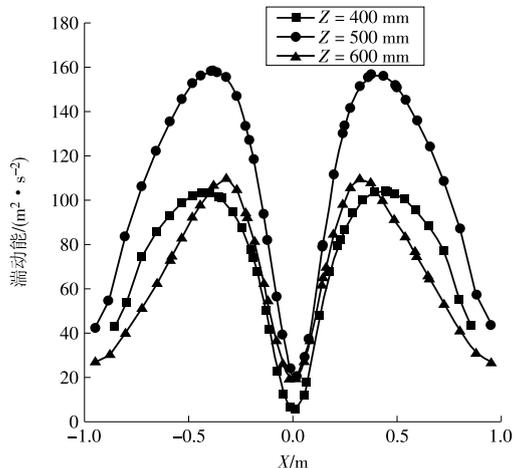


图 7 湍动能分布

4.3.2 湍动能耗散率

湍动能耗散率指脉动黏性应力与脉动应变率的乘积,湍动能耗散率表示湍流动能与分子动能之间发生转换,最终这些能量以热量的形式消耗。

湍动能耗散度的分布也是在旋风分离器的圆柱段较大,在旋风分离器下部较小,如图 8 所示。这个特点和湍动能分布一样。说明在圆柱段气流湍动最为强烈,运动规律性较低,损失的能量也越多,与湍动能的结论一致。湍动能耗散度的值在中心筒与旋风分离器内的地方值比较大。

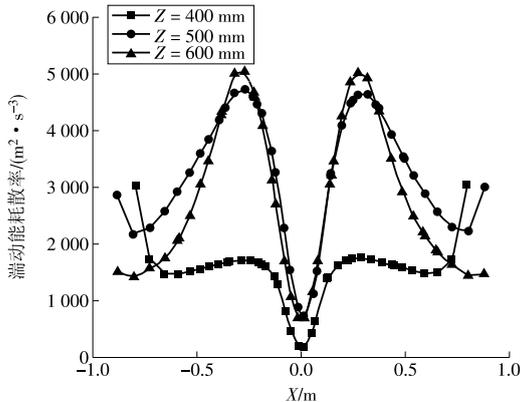


图 8 湍动能耗散率分布

流场的湍流结构能将湍流能量的分布以及损失情况都反映出来,当做一些适当的改造能够减少湍动能和湍动能耗散度时,也就能相应的提高旋风分离器的分离效率,降低旋风分离器的能耗。

(上接第 21 页) 件驱动滚筒、2 件导向滚筒、2 台 H3SH7A 减速器、2 台 1 800 kW 变频电动机、2 台额定电流 260 A 变频器、2 台额定容量 3 000 kV·A 变压器、1 台逆止器、1 面可编程逻辑控制器(PLC)同步柜、2 800 m 矿用电缆、3 面高压柜等。该方案需投资约 2 500 万元,设备采购周期为 4~6 个月,硐室、基础施工工期为 40 d,皮带机机架安装、皮带对接工期 10~15 d(停产施工)。

表 3 输送机张力分布情况对照

项目	原数据	改造后数据
承载段阻力 F_F	220 155	254 366
倾斜阻力 F_P	534 799	668 480
圆周力 F_u	841 266	1 011 178
单个电机圆周力 F_m	280 422	200 000
满足传动条件 S_{4min}	151 268	119 000
输送机正常运行 S_{3min}	220 969	220 969

5 结束语

主井皮带机改造后输送能力达到 5 000 t/h,皮带安全系数由 7.11 提高到 8.79,头部最大张力由

5 结束语

(1) 气体在分离器内速度可以分解为 3 个,其中气流的切向速度对运动的影响最大。旋风分离器内静压和总压的分布基本一样,会在中心处的值比较小,在两侧的值比较大,并且在轴线两边左右分布一样。

(2) 从模拟处理后的结果可以看出,颗粒在旋风分离器内做旋转运动,通过旋转到达排灰口排出,10 μm 的颗粒转的圈数比 3 μm 颗粒的少,在其内部停留的时间也短。另外可以看到有一部分颗粒直接从中心筒逃跑了,3 μm 的颗粒比 10 μm 的颗粒更容易发生这种情况。

参考文献:

- [1] 魏新利,张海红,王定标,等. 旋风分离器内颗粒轨迹的数值模拟[J]. 郑州大学学报(工学版),2004,25(3): 14-17.
- [2] Yang W Q, Liu S. Role of tomography in gas/solids flow measurement[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2000,11(3):237-244.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

刘云峰(1986—),男,河南周口人,助理工程师,从事机电研究方面的工作(E-mail:412697294@qq.com)。

1 074 506 N 降低到 827 675 N,卸载滚筒合力下降约 246 831 N,主井皮带机运行工况明显改善,平均 4 500 t/h 负荷下能重载启动。系统煤量不均衡问题及矸石损伤带面问题得到解决,系统平均运输能力达到 4 000 t/h,矿井具备 15 Mt/a 及以上生产能力要求。

参考文献:

- [1]《实用机械设计手册》编写组. 实用机械设计手册(上、下册)[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2]《中国机械设计大典》编委会. 中国机械设计大典(第 3、4 卷)[M]. 江西:江西科学技术出版社,2001.
- [3]《机械设计手册》编委会. 机械设计手册(第 3 卷)[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [4]王世刚,张秀亲,苗淑杰. 机械设计实践(上、下册)[M]. 修订版. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2003.
- [5]谢锡纯,李晓豁. 矿山机械与设备[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2000.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

常文浩(1974—),男,陕西韩城人,工程师 工学硕士,从事煤矿机电设备管理方面的工作(E-mail:996341872@qq.com)。