

模拟与仿真

引文格式:尹阳,孟晨,王鸿运,等. 旋风反应器的流场模拟与优化研究[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(1): 100-112.

YIN Yang, MENG Chen, WANG Hongyun, et al. Research on flow field simulation and optimization of cyclone reactor[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(1): 100-112.

旋风反应器的流场模拟与优化研究

尹 阳^{1,2}, 孟 晨^{1,2}, 王鸿运³, 刘 燕^{1,2}, 张延安^{1,2}

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

3. 沈阳铝镁设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110001)

[摘 要] 本文基于水泥厂悬浮预热设备中旋风分离器的结构特点与高硫铝土矿焙烧反应特性, 创新性地提出了旋风反应器的设计理念, 并首次将其应用于高硫铝土矿焙烧脱硫的试验研究中。该反应器内焙烧脱硫反应属于“悬浮焙烧”, 颗粒处于良好的流化运动状态, 气固传质传热效率高, 脱硫效率高。本研究通过数值模拟分析了反应器内部的速度场和压力场分布, 采用 Fluent 软件对单级旋风反应器进行模拟, 重点探讨了切向、轴向和径向速度的分布规律, 以及静压、动压和总压的变化。结果表明, 切向速度在蜗壳区收缩段达到峰值, 轴向速度在蜗壳区呈现双峰分布, 有效延长了颗粒的停留时间; 静压分布呈现中心低、两侧高的特点, 动压分布与切向速度相似, 总压分布与静压大体一致; 随着气速增加, 压降损失逐渐增大, 且速度越大, 压降变化幅度越明显; 在确保反应效率的同时, 应优先考虑采用较低的气体流速, 以降低能源消耗。本研究为优化旋风反应器设计提供了理论依据, 有助于提高高硫铝土矿脱硫效率并降低生产成本。

[关键词] 高硫铝土矿; 旋风反应器; 悬浮焙烧; 数值模拟; 流场分析; 压降优化

[中图分类号] TF821; TF806; [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)01-0100-13

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.01.012

0 引言

焙烧脱硫技术在高硫铝土矿处理领域展现出显著的应用优势和发展潜力。该技术不仅能有效分解含硫矿物实现深度脱硫, 还能通过调控铝土矿

物相结构显著改善后续氧化铝生产的工艺性能。然而, 在实际生产中, 静态焙烧高硫铝土矿存在脱硫效果差、 SO_2 表面富集等问题, 易引发“欠烧”或“过烧”现象^[1]。因此, 迫切需要深入研究焙烧过程中的脱硫机理, 开发适用于高硫铝土矿的高效、节能、经济的脱硫技术和设备。旋风分离器作为基于离心力原理的气固分离设备, 其核心机理在于利用高速旋转气流场产生的离心力实现颗粒分离。具体而言, 含尘烟气进入分离器后, 在体积扩张与重力作用下完成初级沉降; 同步形成的高速旋转气流产生强大离心力, 使固体颗粒被抛向分离器壁面并沿壁面下滑至底部集尘口排出, 净化气体则从顶部

[收稿日期] 2025-08-20 [修订日期] 2025-10-01

[录用日期] 2025-10-05 [出版日期] 2026-02-01

[第一作者] 尹阳(2000—), 女, 辽宁北镇人, 硕士研究生, 主要从事冶金反应器数值模拟研究。

[通信作者] 刘燕, 女, 博士, 教授/博士生导师, 东北大学化学工程与技术学科学术带头人。

[基金项目] 国家自然科学基金项目“中低品位高硫铝土矿碱基氢还原-钙化转型过程中矿相演变机制研究”(U23A20610)。

排气管排出^[2]。这种分离机制使得旋风分离器在保持结构简单、制造和维护成本较低的同时,可高效分离微米级固体颗粒,尤其适用于高温、高压及化学腐蚀等极端工况。基于其优异的分离效率、强适应性和低运行成本等性能优势,该设备已广泛应用于石油化工、环保、医药等领域。

在技术创新方面,本研究团队基于水泥厂悬浮预热设备中旋风分离器的结构特点与高硫铝土矿焙烧反应特性,创新性提出了旋风反应器的设计理念,并首次将其应用于高硫铝土矿焙烧脱硫的试验研究中。该反应器内焙烧脱硫反应属于“悬浮焙烧”,颗粒处于良好的流化运动状态,气固传质传热效率高,脱硫效率高。反应过程中矿石内部的水分和气体得以短时间内快速脱除,并在矿石表面形成更多的微孔,显著改善矿石与苛碱溶液间的浸润性,有利于后续拜耳法溶出。该技术旨在通过新型设备降低能耗、减少脱硫成本,为相关领域的技术进步提供了新型装备解决方案。当前学术界对旋风反应器的模拟研究尚处探索阶段,研究重点仍集中在旋风分离器方面。山东理工大学唐守强^[3]运用雷诺应力模型对反应器内部气相流场进行模拟,发现速度分布呈现双层旋流特征,且内部湍流强度大,表现出显著的各向异性。东北大学宋勇^[4]针对CLA/T型旋风分离器开展了系统的数值模拟研究,重点探究了其内部气相流场特征和气固两相流场的分布规律,确立了适用于该类旋风分离器的湍流模型和数值模拟方法,为准确预测分离器性能提供了理论基础。同时,通过考察关键结构参数对分离性能的影响规律,提出了结构优化方案并进行了效果评估,为CLA/T型旋风分离器的工程应用提供了重要参考。浙江理工大学刘琳^[5]则采用RSM模型分析流场湍流规律,并结合DPM和DRW模型研究分离器内部流场分布及颗粒运动规律,研究表明,增加排气管深度可有效消除短路现象,从而实现稳涡效果。东南大学孙世超^[6]对新型气动式旋风分离器的性能进行了深入研究,通过数值模拟与冷态试验相结合的方法,探讨了两种旋风分离器在不同气动速度下对分离效率的影响,为分离器性能的灵活调控提供了理论依据。尽管国内外学者基于旋风分离器的工作机理,通过试验或数值模拟的方法对其运行性能进行了大量研究和优化,但目前的研究重点主要集中在提高分离效率方面,对利用旋转气

流增强气固或气液之间的混合与接触的研究相对不足。因此,深入研究旋风反应器内气流运动规律,促进反应器内部化学反应或物理过程的进行具有重要的理论价值和现实意义。

本研究基于悬浮预热设备中旋风分离器的结构特点,通过优化设计延长颗粒在反应器中的停留时间,并将其应用于高硫铝土矿脱硫过程。研究采用Fluent商业仿真软件对单极旋风反应器进行数值模拟,直观展现反应器内部的三维流场结构,包括速度分布、压力分布等关键参数。通过深入分析气体流动规律和旋流形成机制,探究不同进气速度对流场特性的影响,为优化反应器结构,延长颗粒停留时间,提高反应效率提供科学依据。

1 数值模拟方法

1.1 计算模型

本研究的湍流模型采用Realizable k- ϵ 模型,扩散项的离散化处理运用中心差分格式^[7],对流项则采用二阶迎风格式^[8],压力场的插值计算采用PRESTO格式^[9],压力与速度场的耦合求解则依托SIMPLE算法实现。

1.2 物理模型

旋风反应器几何结构如图1所示。以排气口中心处作为原点,沿着中心轴线向上为Z轴的正方向,其基本结构包括进气口、排气口、颗粒入口、排尘口、蜗壳区、圆柱段、圆锥段。各部分结构的参数数值如下: $D=178.7\text{ mm}$, $d=128.3\text{ mm}$, $S=88.9\text{ mm}$, $H=461.8\text{ mm}$, $h=287.6\text{ mm}$, $B=21.7\text{ mm}$ 。

1.3 网格划分

利用ANSYS ICEM-CFD生成网格,网格类型选用非结构化四面体网格,并通过光顺优化网格质量。定义排气口为inp,排尘口为out,进气口为ingas、颗粒入口为inp2。最终网格数为17万,三维网格划分如图2所示。

1.4 边界条件

在入口区域,假定气流已达到充分发展的湍流状态,其流动方向与入口平面正交,且入口处的速度分布呈现均匀特性。进气口设为速度入口,通过水力直径 D_h 和湍流强度 I 来计算出入口处的湍流动能 k 和湍流扩散率 ϵ ,经验公式见式(1)~(3)。

$$k = \frac{3}{2}(u_i I)^2 \quad (1)$$

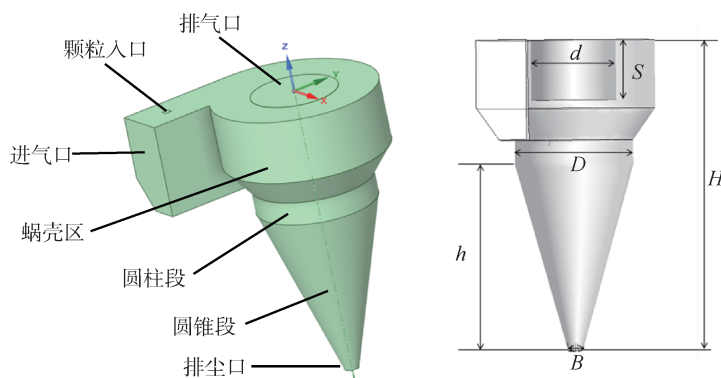


图1 旋风反应器几何及结构示意图

Fig. 1 Geometric and structural schematic diagram of cyclone reactor

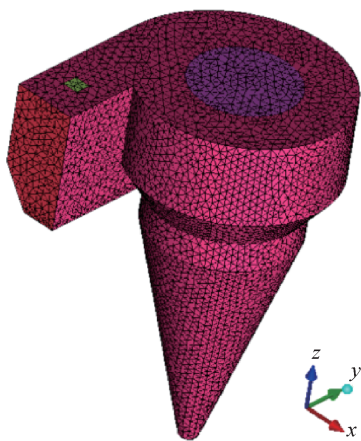


图2 三维网格划分

Fig. 2 Three dimensional mesh division

$$\varepsilon = C_{\mu}^{0.75} k^{1.5} / l \quad (2)$$

$$l = 0.08 D_H \quad (3)$$

式中: C_{μ} 为经验常数; u_i 为入口风速, m/s; l 为湍流特征尺寸, m; D_H 为入口截面水力直径, m。

排气口和排尘口均定义为压力出口 (Press-out), 水力直径 D_H 分别为相应出口的直径, 湍流强度公式计算求得。在贴近壁面的区域, 设定为无滑移边界条件, 不考虑壁面的粗糙度影响, 并应用标准壁面函数法进行解析。

2 数值模拟结果分析

2.1 旋风反应器内速度分布规律

旋风反应器内部发生的是气固两相反应, 且其颗粒粒径较小, 因此颗粒对气流的影响比较小, 气相流场在其中起主导作用。基于此, 优先对气相流场进行分析。将模拟结果进行后处理, 以此来反应内部流场的运动情况。在流场相关的所有特性中,

速度的分布对颗粒分离及运动规律具有很重要影响, 故首先对内部的速度场进行分析。

图3是入口风速为 1.056 m/s 时, $X=0$ 中心截面总速度分布。其中图(a)为速度云图, 图(b)为速度等值线图。云图数据表明, 中心区域及壁面附近的流速较低, 由中心处沿着半径方向往两端流速呈现先增大后减小的趋势。结合等值线图可以发现, 在中心轴壁面附近流速的变化率较大。此外, 云图显示在排气管内壁入口两侧存在明显的速度偏大区域, 结合等值线图可以发现速度达到 2.6 m/s (速度最大值), 表明此处出现较剧烈的紊流, 且有部分气体进入反应器后直接从排气管底部离开旋风反应器, 造成所谓的“短路流”。气体进入反应器后沿器壁下行, 受排尘口压力出口条件制约, 少部分气体从底部排出, 大部分气体转而向上, 在锥体部分产生二次涡流。

图4为旋风反应器内部气体流线图。当气体进入反应器受壁面约束作用, 形成向下的旋转流动。在流动过程中, 外层气体逐渐发展为涡旋运动, 形成准自由涡结构。当气流到达反应器底部后, 流动方向发生转变, 形成向上的内层旋转流, 该部分呈现强制涡特征。这种流动形态形成了外准自由涡与内强制涡的双涡结构。

图5是不同轴向高度上截面的选取。为进一步了解气体进入旋风反应器后的运动情况, 选取 $Z=-0.05$ m (蜗壳中心)、 $Z=-0.12$ m (颗粒掉落段)、 $Z=-0.2$ m (圆锥段1)、 $Z=-0.35$ m (圆锥段2) 四个截面, 分析各截面速度矢量分布, 结果如图6所示。由于蜗壳区域的不对称性, 各截面的速度矢量旋转中心发生不同程度的偏移。

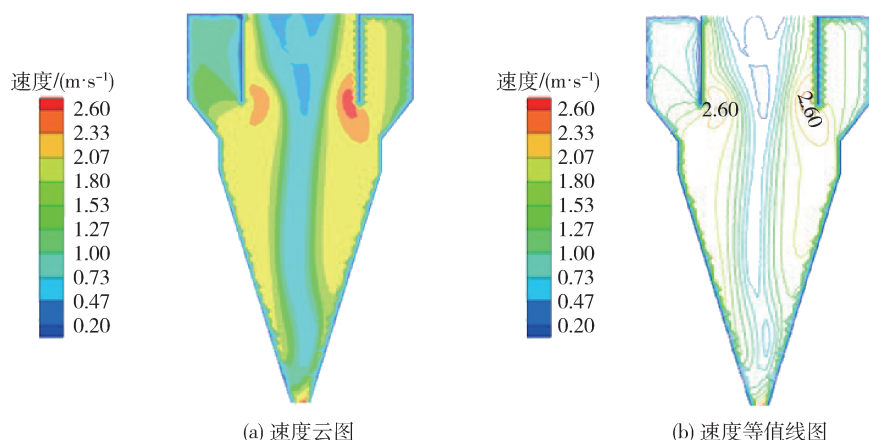
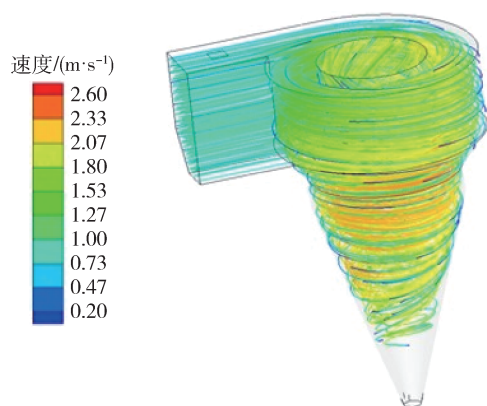
图3 $X=0$ 中心截面总速度分布Fig. 3 Total velocity distribution of $X=0$ center section

图4 旋风反应器内部气相流线图

Fig. 4 Internal gas-phase streamline diagram of cyclone reactor

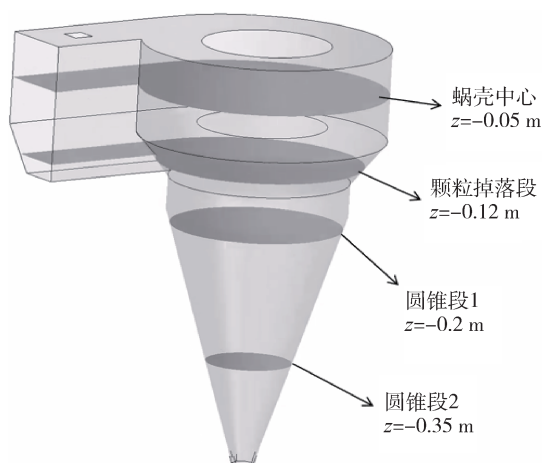


图5 旋风反应器各截面选取

Fig. 5 Selection of each section of the cyclone reactor

旋风反应器内部的流动呈现显著的三维旋流特征。为系统研究其流场特性,可采用速度分解

法,将空间任一点的流动速度矢量解析为三个相互垂直的分量:沿圆周方向的切向速度、沿轴线方向的轴向速度以及沿径向的径向速度^[10]。对三个分速度分别进行展开研究,也可得出气流的总体运动特性。

2.1.1 切向速度

在实际的运动过程中,气流进入旋风反应器后由直线运动转化为切向运动,因此切向速度在三个分速度中具有最大数量级。在气固分离过程中,切向速度对分离效果具有决定性影响,其运动状态(速度大小、方向、分布等)直接影响旋风反应器的分离效率。图7为 $X=0$ 中心截面的切向速度云图。切向速度分量普遍呈现负值特征,根据右手定则,当以Z轴正向为参考方向时,切向速度的正方向与Z轴负向。旋风反应器排气管内壁入口附近存在最大切向速度并伴随“短路流”现象。气流经反应器进气口进入后,在蜗壳扩展区域初始阶段呈现平缓增速特征。随着气流进入蜗壳收缩段,五边形入口结构和大蜗壳式设计的共同作用使气流切向速度显著提升并迅速达到最大值。这种速度变化特征主要源于反应器独特的结构设计:五边形入口促进了气流的切向加速,而大蜗壳结构则为气流的旋转运动提供了有效的空间约束和能量转换条件。从图中也可以看出切向速度的对称性较差,旋转涡流在旋风反应器的中心区域形成涡核,且整个涡核在锥体部分出现了明显的偏移现象。

图8为不同Z截面的切向速度分布云图。结果表明,由 $Z=-0.05$ m截面(蜗壳中心)到 $Z=-0.35$ m(圆锥段2),随着高度的变化,切向速度在 $Z=$

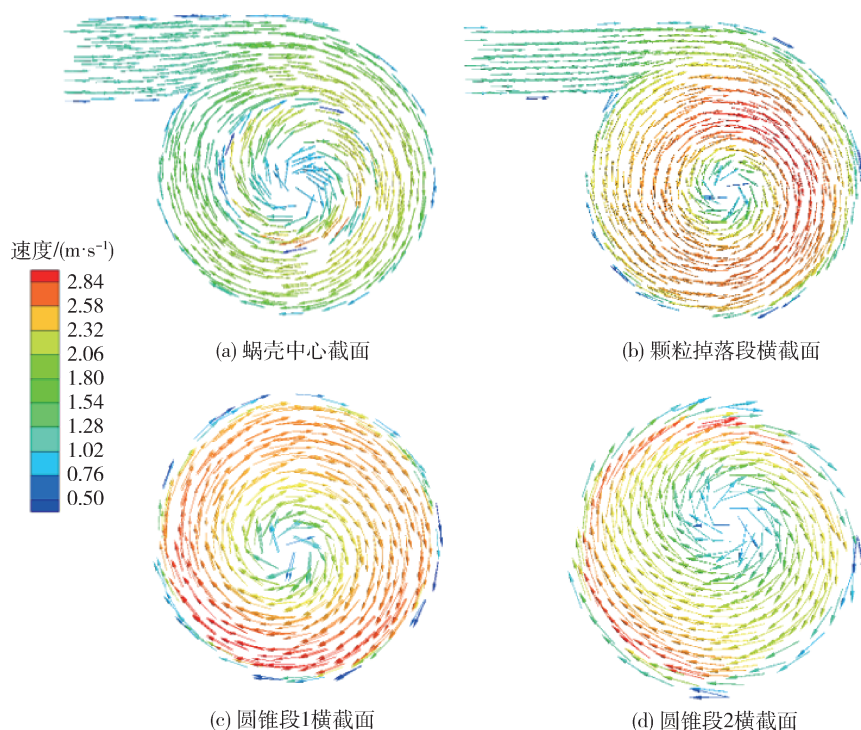
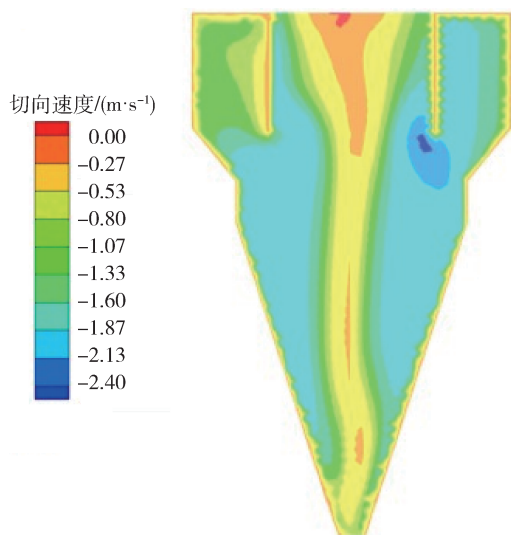
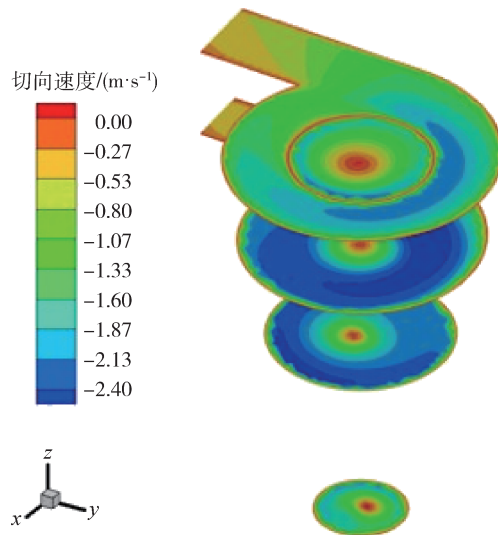


图6 旋风反应器内各截面速度矢量分布图

Fig. 6 Velocity vector distribution diagram of various cross-sections inside the cyclone reactor

图7 旋风反应器 $X=0$ 中心截面切向速度云图Fig. 7 Cloud map of tangential velocity at the center section of cyclone reactor $X=0$

-0.12 m 截面达到最大值,因为此截面正位于蜗壳区收缩段,切向速度由于蜗壳结构的收缩而增大,在 $Z=-0.35$ m 截面速度显著降低,此截面位于圆锥段,当流体接近旋风反应器的锥体部分时,受到锥体收缩的影响,气流旋转向上,流体的流动方向开

图8 不同 Z 截面的切向速度分布云图Fig. 8 Tangential velocity distribution cloud map for different Z cross-sections

始发生变化。对比不同高度下的四个截面来看,在同一 Z 截面上,沿着半径方向切向速度由中心向外呈现先增大后减小的趋势。其中 $Z=-0.35$ m 截面的涡核偏移特征尤为显著表明该区域存在剧烈的气流不稳定运动。

为更好地反映切向速度的分布情况,分别绘制 $X=0$ 中心截面上不同轴向位置($Z=-0.05\text{ m}$ 、 $Z=-0.12\text{ m}$ 、 $Z=-0.2\text{ m}$ 、 $Z=-0.35\text{ m}$)的切向速度分布曲线图,如图9所示。图中 $Z=-0.05\text{ m}$ 截面出现两次峰值的产生,是由于排气管边壁造成的波动,因为其正位于排气管入口附近的轴向高度上。

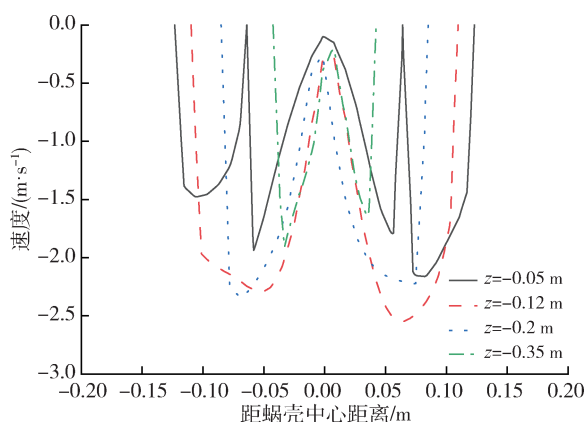


图9 不同Z截面切向速度分布曲线

Fig. 9 Tangential velocity distribution curves for different Z-sections

2.1.2 轴向速度

轴向速度分为外层的下行流和内层的上行流。图10为 $X=0$ 中心截面的轴向速度分布云图,显示轴向速度分布无明显规律。在旋风反应器壁面区域,气体呈现明显的下行运动趋势,当气流到达排尘口

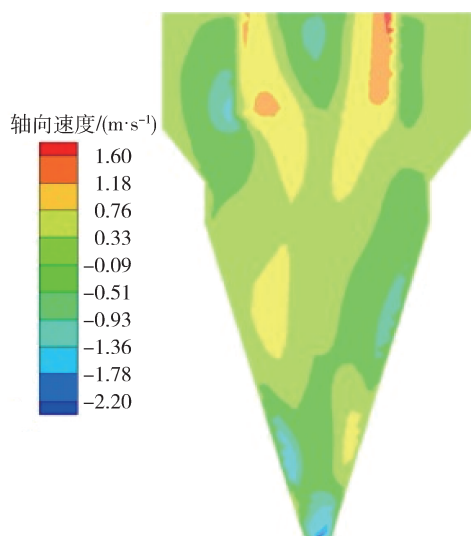


图10 $X=0$ 中心截面轴向速度分布

Fig. 10 Axial velocity distribution at $X=0$ center section

位置时,大部分气体流动方向转变成向上回流。这种双向流动的相互作用导致反应器下部区域产生复杂二次涡流结构。这种涡流特征通过改变局部湍动能分布和颗粒物运动轨迹,直接影响颗粒反应效率和流场稳定性。

图11和图12为不同Z截面的轴向速度分布云图和曲线图。显示轴向速度在蜗壳区呈现先增大后减小、再增大再减小的“双峰”分布趋势(倒w型),称为滞留现象。该滞留现象表明蜗壳区对于颗粒有明显的滞留效果,有利于延长颗粒的停留时间。各截面的最大轴向速度位置均存在径向偏移,轴向速度场表现出显著的纵向梯度特征,随着Z坐标值的减小(即沿反应器高度方向向下),轴向速度整体呈现衰减趋势,其最大轴向速度值也相应降低。

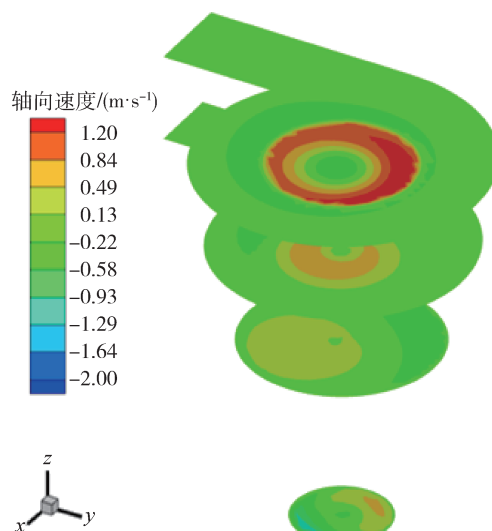


图11 不同Z截面的轴向速度分布

Fig. 11 Axial velocity distribution of different Z-sections

2.1.3 径向速度

径向速度作为描述气流在径向方向运动特征的关键参数,其空间分布呈现显著非均匀性和复杂性。图13是 $X=0$ 中心截面的径向速度分布云图。从图中可以看出,径向速度值较小,这源于颗粒在径向的运动距离较切向和轴向显著缩短。虽然径向速度的值较小,但有助于维持颗粒在旋流场中的稳定悬浮状态,同时避免因径向速度过大导致的颗粒过早沉积,从而在气固分离效率和颗粒停留时间之间实现优化平衡,在气流对颗粒径向输运及分离

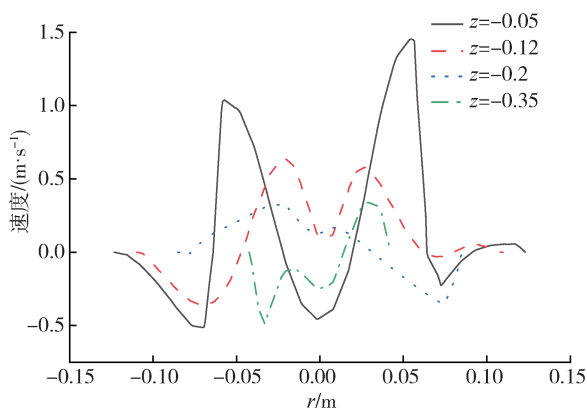
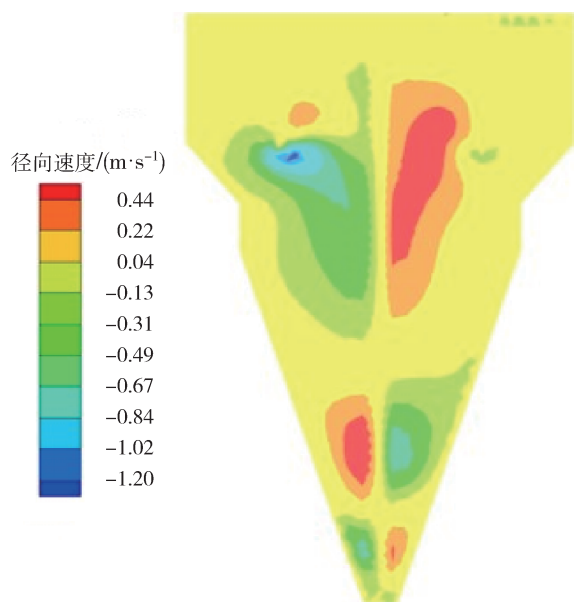


图 12 不同Z截面的轴向速度分布曲线

Fig. 12 Axial velocity distribution curves for different Z-sections

图 13 $X=0$ 中心截面径向速度分布云图Fig. 13 Cloud map of radial velocity distribution at $X=0$ center section

过程中仍发挥关键作用。

图 14 和图 15 为不同 Z 截面的径向速度分布云图和曲线图。径向速度场的空间分布呈现显著分区特征:在流场核心区域表现为类源流特性,径向速度以正向为主,表明气流向外扩散;而在外围区域则主要表现为类汇流特征,径向速度以负向为主,反映气流向内汇聚。径向速度在三维空间中分布虽然表现出整体非均匀性,但在特定剖面上呈现明显规律性特征。在 $X=0$ 中心截面上,径向速度场正负值成对出现且空间上交替分布。沿 Z 轴方

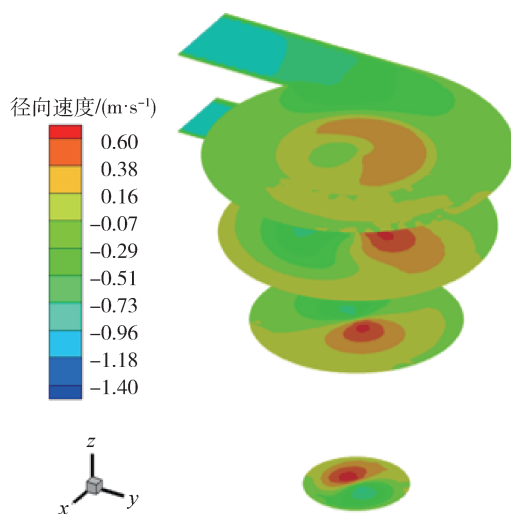


图 14 不同Z截面径向速度分布云图

Fig. 14 Cloud map of radial velocity distribution at different Z-sections

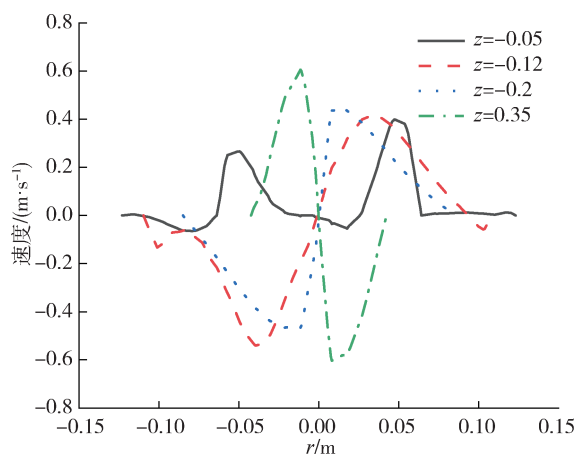


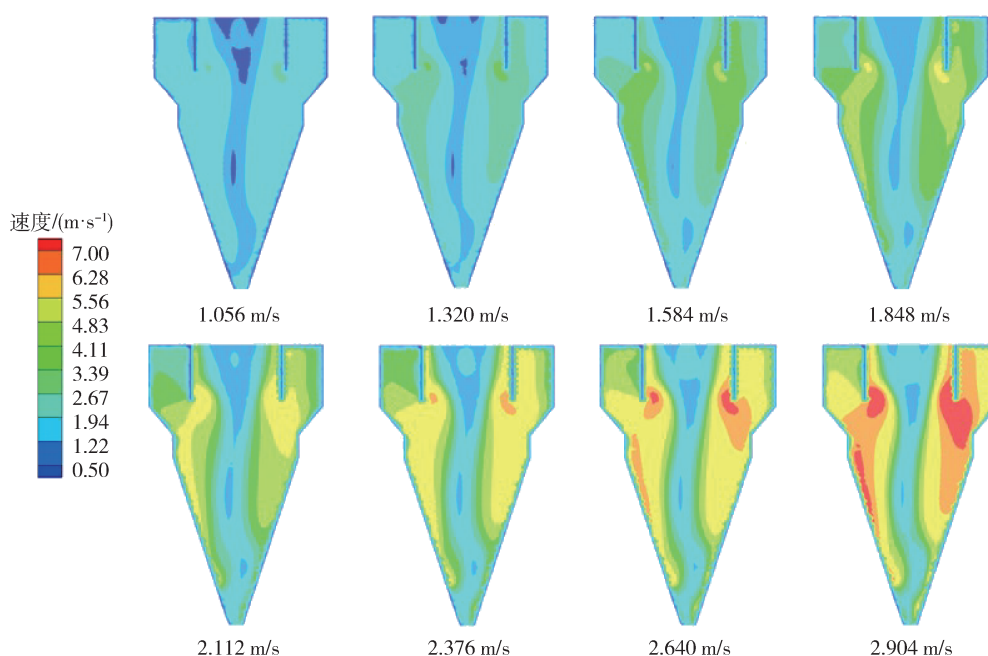
图 15 不同Z截面的径向速度分布曲线

Fig. 15 Radial velocity distribution curves for different Z-sections

向,这种正负交替的分布特征呈现螺旋上升的形态。

2.1.4 不同风速下的速度分布

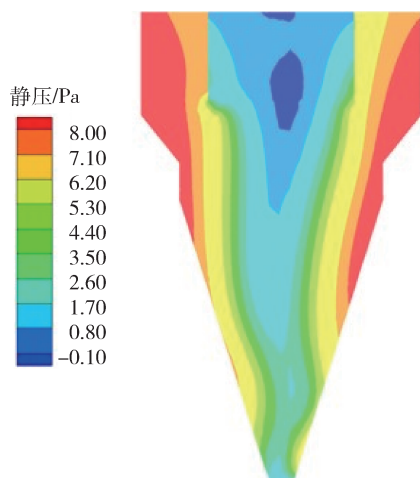
图 16 是不同风速条件下 $X=0$ 中心截面的速度分布云图。由图中可以看出,在较低的风速时,低速区和高速区的界限相对模糊,随着风速增加,高速区范围逐渐增大,而低速区则相对缩小,形成清晰的速度梯度。从图中还可以看出,不同风速下速度对称性均较差,这源于五边形入口的单侧进入,同时受大蜗壳渐缩结构的影响,会导致风速分布的不对称。

图 16 不同气速下 $X=0$ 中心截面的速度分布云图Fig. 16 Velocity distribution cloud map of $X=0$ center section at different gas velocities

2.2 旋风反应器内部压力分布规律及压力损失研究

2.2.1 静压分布

图 17 是 $X=0$ 中心截面静压分布云图。沿着半径方向静压值由外向内逐渐递减,在中心轴线区域出现显著的静压降,这主要归因于该区域存在强制涡流结构。气体在此处呈现强烈的旋转运动,导致压力场在法向产生显著梯度变化,从而形成低压区。此外,只有排气管入口附近出现了负压,这使

图 17 $X=0$ 中心截面静压分布云图Fig. 17 Static pressure distribution at $X=0$ center section

得在上行流中出现了逆压梯度,但是流体依旧向上运动,这类似于拉瓦尔喷管中减速增压的过程^[11]。

静压分布相对于旋风反应器的几何中心轴线对称性较差,图 18 进一步揭示不同 Z 截面上的静压最小值发生偏移,均与中心轴位置产生不同程度的偏差。

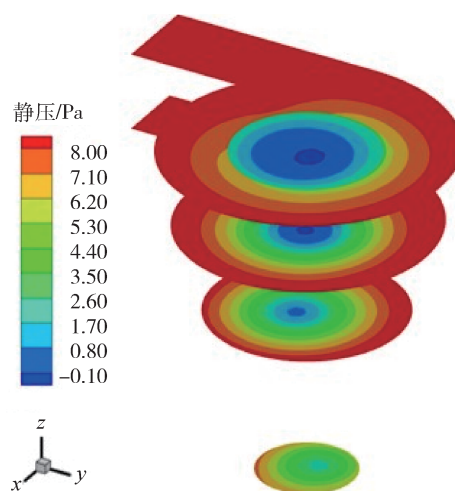
图 18 不同 Z 截面静压分布Fig. 18 Static pressure distribution at different Z -sections

图 19 是不同 Z 截面的静压分布曲线。结果表明,靠近反应器壁面处压力分布相对较缓,而中心轴线附近的压力变化较大,且在 $Z=-0.05$ m 截面和

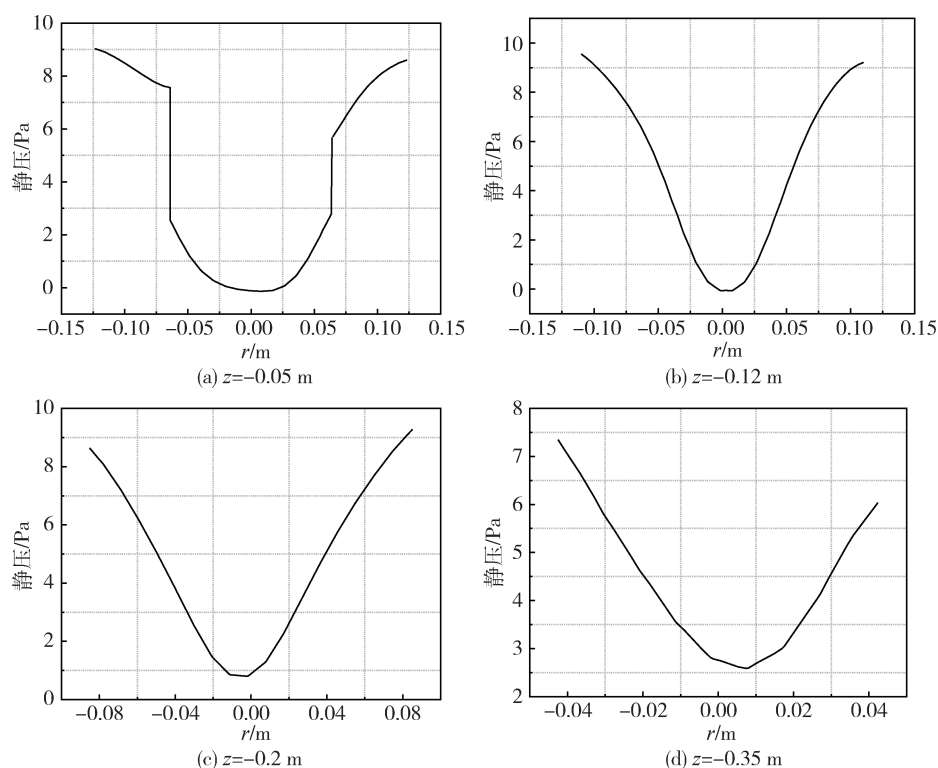


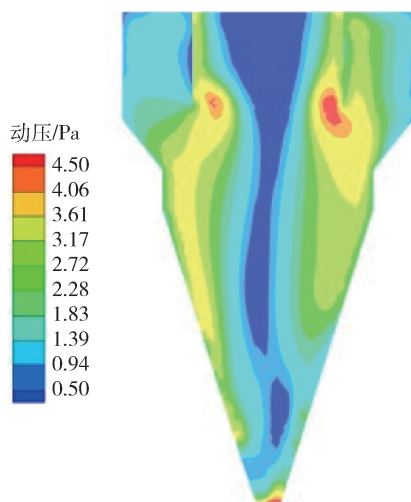
图19 不同Z截面静压分布曲线

Fig. 19 Static pressure distribution curves for different Z sections

$Z=-0.12\text{ m}$ 截面的轴心附近出现负值,这主要因为旋风反应器内部中心存在的强制涡使压力变化较陡,而外层自由涡的存在使静压变化趋于平缓。

2.2.2 动压分布

图20是 $X=0$ 中心截面动压分布云图。动压分

图20 $X=0$ 中心截面动压分布云图Fig. 20 Cloud map of dynamic pressure distribution at $X=0$ center section

布呈现与切向速度相似的变化趋势,这主要源于动压与流体速度之间存在二次方关系($P=(1/2)\rho u^2$, ρ 表示流体密度, u 表示流体速度)。

图21是不同高度下动压分布曲线图。可以看出不同截面上动压分布规律不相同,中心处动压接近0。从整体上看,动压的分布无明显对称规律,主要是由于切向速度的分布不对称造成。

2.2.3 总压分布

总压是静压和动压的叠加, $X=0$ 中心截面总压分布与不同Z截面总压分布分别如图22和图23所示。总压分布与静压分呈现相似空间构型,主要原因在于动压在叠加过程中的作用相对较小。总压沿径向方向递减,轴心处总压最低,趋近于0。在排气管区域,由于“二次涡流”和“二次夹带”效应的共同作用,该区域的静压、动压和总压参数均表现出显著波动。同时,中心强制涡的“摆尾”效应导致旋风反应器锥体底部中心区域出现明显的摆动现象。

2.2.4 不同风速下的压力分布

图24是不同风速下的压力分布云图。数据显示,随着气流速度增加,压力逐渐增大,而低压区逐

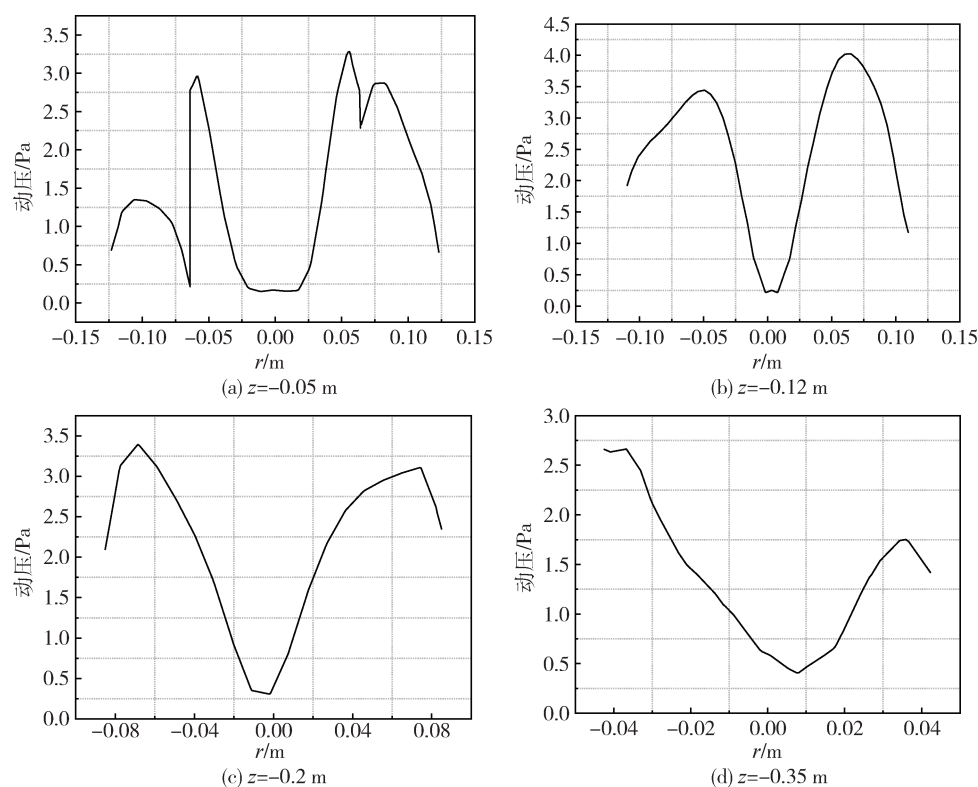
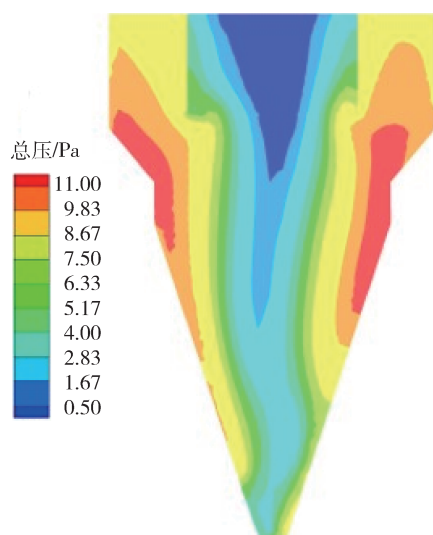


图21 不同Z截面动压分布曲线

Fig. 21 Dynamic pressure distribution curves for different Z-sections

图22 $X=0$ 中心截面总压分布云图Fig. 22 Cloud chart of total pressure distribution at $X=0$ center section

渐缩小。旋风反应器内的总压是静压和动压的叠加,其中动压的大小与速度呈二次相关。风速增大显著提升动压变化幅值,继而压力逐渐上升。此外,不同速度下压力分布相对于中心轴线的对称性

均较差,且随着风速增加,气流旋转的动力也会增强,可以看出压力变化趋势更为明显,中心的负压区域明显增加。

2.2.5 压力损失研究

从流体力学理论分析,流动过程能量损失主要由沿程损失和局部损失构成^[12]。其物理本质均源于流体的黏性特性,具体表现为黏性耗散效应。黏性耗散是指黏性流体在流动过程中,由于速度梯度引起的剪切变形,将部分机械能通过分子间相互作用转化为热能的过程。旋风反应器的局部压力损失主要源于气体进入反应器引发的流场突变效应。具体表现为气体流经入口进入反应器内部时,其运动方向发生急剧偏转并伴随速度场重新分布过程,这种流场结构剧烈变化导致局部区域出现显著的能量耗散。从压强变化的角度分析,旋风反应器的压降主要包括以下八类^[13]:①进气口的摩擦;②排气管处的摩擦损失;③气体进入反应器后内部结构变化导致能量损失;④气体与器壁的摩擦损失;⑤气流在反应器内部旋转所产生的动能损耗;⑥进入排气管处突然缩小造成能量损失;⑦进出口的近

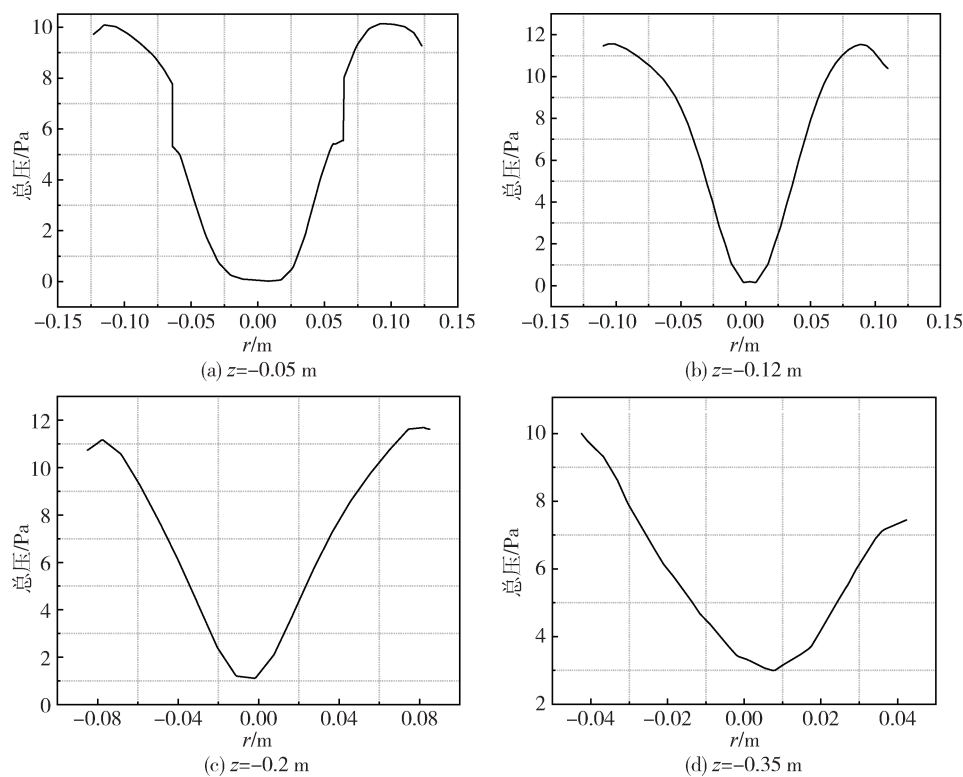


图 23 不同Z截面总压分布曲线

Fig. 23 Total pressure distribution curves for different Z-sections

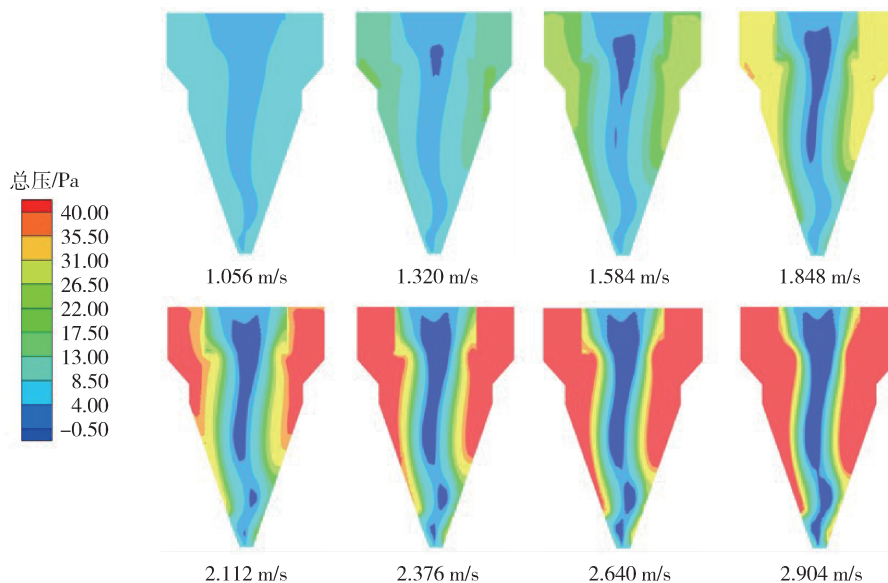


图 24 不同气速下X=0中心截面压力分布

Fig. 24 Pressure distribution at the center section of X=0 at different gas velocities

势能损失;⑧排气管内的能量回收。

压降作为评判旋风反应器性能的重要指标,可通过数值模拟进出口压力结果的后处理获得。旋风反应器的压降等于进口总压减去出口总压,入口处

的压力平缓容易得出,出口处的压力存在一定的不均匀性,可通过Fluent中的面积加权平均法(Area-Weighted Average)分别计算出入口和出口的总压值。

不同入口气速下对应的压降值如表1所示,为

了更方便的观察不同风速下压降值的变化特点,将表1转换为曲线,如图25所示。

表1 不同速度下的压降值

Table 1 Pressure drop values at different speeds

风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.056	1.320	1.584	1.848	2.112	2.376	2.640	2.904
压降值/Pa	8.80	13.81	20.06	27.51	36.14	46.29	57.57	70.25

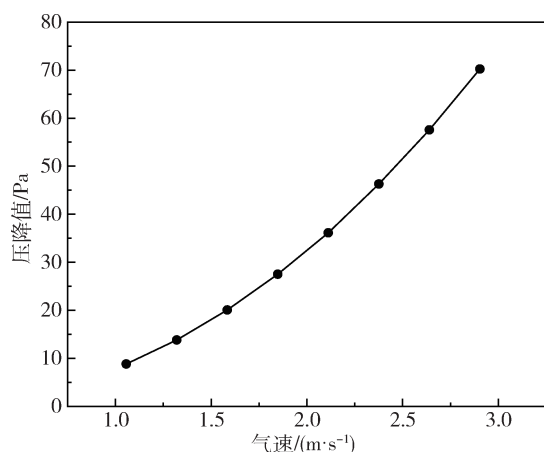


图25 不同风速下的压降

Fig. 25 Pressure drop at different gas velocities

由图25可以清晰看到,随着入口风速的增加,旋风反应器的总压降值在增加,且速度值越大对应的压降值变化的幅度越大。从能量角度看,这是由于入口风速越大,进入反应器后切向速度也越大,与壁面间的摩擦损失就越大,并且摩擦损失的大小与切向速度值的四次方^[14]成正比,过大的风速会大大增加压降损失。因此,在保证旋风反应器性能的前提下尽量选取较低的风速。

3 结论与展望

本文利用SpaceClaim软件建立了旋风反应器的几何模型,通过ICEM软件对模型进行网格划分,并在Fluent中进行设置边界条件等相关操作,对旋风反应器内部的气相流场运动情况进行分析,主要包括速度场、压力场的分布以及压力损失的研究,得到以下主要结论。

1)切向速度在蜗壳区收缩段迅速增加,达到峰值;轴向速度在蜗壳区呈现双峰分布,有利于延长颗粒停留时间;径向速度在中心截面上呈交替上升状。

2)静压分布呈现中心低、两侧高的特点,动压分布与切向速度类似,总压分布与静压大体一致,

静压、动压、总压在锥体底部均出现了“摆尾”现象。

3)压降随风速增加而增大,因此在保证反应性能的前提下,应尽量选择较低风速以减少能耗。

因此,旋风反应器未来研究可从多物理场耦合、结构优化、试验验证、智能控制及全流程能效优化等多维度深入拓展。可进一步开展温度场、浓度场与流场的多场耦合数值模拟,揭示热力学参数与流体动力学行为的协同作用机制;在结构创新方面,可开发多级串联旋风反应器,通过几何参数优化与湍流调控技术协同提升脱硫效率并降低能耗。同时需加强试验验证与工业放大研究,结合冷/热态试验揭示颗粒运动真实规律,建立通用化放大设计准则以加速技术转化。引入AI机器学习与动态监测技术,可发展智能控制系统以增强反应器工况适应性。这些探索将推动旋风反应器向高效、智能、绿色方向升级,为复杂矿物资源清洁利用提供理论支撑与技术突破。

[参考文献]

- [1] 王如凯, 李军旗, 陈朝铁. 高硫铝土矿脱硫浅析[J]. 广州化工, 2014, 42(22): 33-35.
WANG Rukai, LI Junqi, CHEN Chaoyi. Analysis of desulfurization of high sulfur bauxite [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42 (22): 33-35.
- [2] A. C. 霍夫曼, L. E. 斯坦因. 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. Cyclone separators: principles, design, and engineering applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [3] 唐守强. 基于CFD的旋风分离器性能参数影响研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2015.
TANG Shouqiang. Research on the influence of performance parameters of cyclone separators based on CFD [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2015.
- [4] 宋勇. 旋风分离器内气固两相流场数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
SONG Yong. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow field in cyclone separator [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [5] 刘琳. 旋风分离器内气固两相流数值模拟与稳定性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.
LIU Lin. Numerical simulation and stability study of gas-solid two-phase flow in cyclone separator [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [6] 孙世超. 新型气动式旋风分离器冷态实验及数值模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
SUN Shichao. Cold state experiment and numerical simulation study of a new pneumatic cyclone separator [D]. Nanjing:

- Southeast University, 2021.
- [7] 许伟伟, 金有海, 王建军. 两种不同入口形式的旋风分离器内流动分布的对比研究[J]. 流体机械, 2009, 7(10): 1-6.
XU Weiwei, JIN Youhai, WANG Jianjun. Comparative study on flow distribution inside two different inlet forms of cyclone separators[J]. Fluid Machinery, 2009, 7(10): 1-6.
- [8] 梁绍青, 王铨健. 旋风分离器流场数值模拟及其涡结构识别[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1): 262-266.
LIANG Shaoqing, WANG Chengjian. Numerical simulation of flow field in cyclone separator and identification of vortex structure[J]. Journal of Coal Industry, 2014, 39(S1): 262-266.
- [9] 刘子红, 肖波, 杨家宽. 旋风分离器两相流研究综述[J]. 中国粉体技术, 2003, 9(3): 41-44.
LIU Zihong, XIAO Bo, YANG Jiakuan. A review of two-phase flow research in cyclone separators [J]. China Powder Technology, 2003, 9(3): 41-44.
- [10] MELLON N, SHARIFF A M. Performance assessment of an inline horizontal swirl tube cyclone for gas-liquid separation at high pressure[J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2011, 20(6): 565-567.
- [11] 王连泽, 彦启森. 三维旋转流场特征与压力损失关系的研究[J]. 工程力学, 1998(4): 43-49.
WANG Lianze, YAN Qisen. Research on the relationship between three dimensional rotating flow field characteristics and pressure loss[J]. Engineering Mechanics, 1998(4): 43-49.
- [12] 岑可法. 旋风燃烧室内气流紊流结构的研究[J]. 浙江大学学报. 1963(2): 129-164.
CEN Kefa. Research on the turbulent structure of airflow in cyclone combustion chamber [J]. Journal of Zhejiang University 1963(2): 129-164.
- [13] 宋勇. 旋风分离器内气固两相流流场数值模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
SONG Yong. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow field in cyclone separator [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [14] AVCI A, KARAGOZ I, SURMEN A. Development of a new method for evaluating vortex length in reversed flow cyclone separators[J]. Powder Technology, 2013, 235: 460-466.

Research on flow field simulation and optimization of cyclone reactor

YIN Yang^{1,2}, MENG Chen^{1,2}, WANG Hongyun³, LIU Yan^{1,2}, ZHANG Ting'an^{1,2}

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallie Minerals (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. Shenyang Aluminum Magnesium Design and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110001, China)

Abstract: This article innovatively proposes the design concept of a cyclone reactor based on the structural characteristics of the cyclone separator in the suspension preheating equipment of cement plants and the characteristics of the high sulfur bauxite roasting reaction, and applies it for the first time in the experimental study of desulfurization in high sulfur bauxite roasting. The calcination desulfurization reaction in this reactor belongs to "suspension calcination", with particles in a good fluidized motion state, high gas-solid mass and heat transfer efficiency, and high desulfurization efficiency. This study analyzed the velocity and pressure field distribution inside the reactor through numerical simulation. Fluent software was used to simulate the unipolar cyclone reactor, focusing on the distribution laws of tangential, axial, and radial velocities, as well as the changes in static pressure, dynamic pressure, and total pressure. The results indicate that the tangential velocity reaches its peak in the contraction section of the snail shell region, while the axial velocity exhibits a bimodal distribution in the snail shell region, effectively prolonging the residence time of particles; The static pressure distribution shows the characteristics of low center and high sides, and the dynamic pressure distribution is similar to the tangential velocity. The total pressure distribution is generally consistent with the static pressure; As the gas velocity increases, the pressure drop loss gradually increases, and the greater the velocity, the more significant the change in pressure drop; While ensuring reaction efficiency, priority should be given to using lower gas flow rates to reduce energy consumption. This study provides a theoretical basis for optimizing the design of cyclone reactors, which helps to improve the desulfurization efficiency of high sulfur bauxite and reduce production costs.

Key words: high sulfur bauxite; cyclone reactor; suspension roasting; numerical simulation; flow field analysis; pressure drop optimization