

高炉轴向旋风除尘器气固流动特性分析

张良^{1,2}

(1. 江汉大学 智能制造学院, 湖北 武汉 430056;

2. 工业烟尘污染控制湖北省重点实验室(江汉大学), 湖北 武汉 430056)

[摘要] 为了获取轴向旋风除尘器内部流场情况,以某钢铁企业轴向旋风除尘器为研究对象,利用有限元分析软件 STAR-CCM+ 建立轴向旋风除尘器分析模型,以离散相模型理论为基础进行数值模拟分析。根据轴向旋风除尘器内部速度和压力分布情况,煤气在经过旋流板后速度得到提高,产生螺旋向下运动,下降过程中在排气管入口和下部锥体会出现两次涡流现象,影响气体流动;压力分布主要分为三个区域:一是旋流板与进气管之间的混合室,由于旋流板具有阻力作用,煤气进入混合室后,压力略有提高;二是除尘器内部,经过旋流板作用,气体压力有所降低;三是排气管内压力较低区域。除尘效率为 83.2%,与实际除尘效率接近。轴向旋风除尘器气固流动特性的分析为进一步优化结构尺寸和提升除尘效率提供理论基础。

[关键词] 高炉; 轴流旋风除尘器; 流场; 流动轨迹

[中图分类号] TF547; X701.2

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2025)05-0074-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.05.011

0 引言

目前,生铁生产仍然以高炉炼铁工艺为主,而高炉炼铁过程中会产生大量的煤气,煤气具有可燃性,可以进行二次利用。由于煤气中含有冶炼粉尘,直接使用会造成管道、设备磨损。因此,需要对高炉煤气进行除尘处理,使粉尘从煤气中分离后才能进一步利用。对高炉煤气进行除尘处理,常采用重力法、离心力法、过滤法等。旋风除尘器属于离心力除尘法采用的设备之一,其工作原理是含尘气体以较高速度在密闭容器中呈螺旋状下降,粉尘运动为垂直向下运动和圆周运动的复合运动。在圆周运动中,粉尘产生离心力向内壁方向移动,到达内壁后螺旋下降至排灰口,进而从气体中分离,达到除

尘目的^[1]。

根据气体进口方式的不同,旋风除尘器分为切向和轴向两种旋风除尘器。国内外学者对切向旋风除尘器进行了深入研究。Misiulia 等^[2]研究了气流入口角度对螺旋形入口旋风除尘器收集效率的影响,通过实验和数值模拟发现,优化入口角度可提升旋风分离器的性能。Fatahian 等^[3]采用雷诺应力模型(RSM)湍流模型求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程,并应用欧拉-拉格朗日两相法进行三维计算流体动力学(CFD)模拟,对矩形旋风除尘器除尘效率进行了分析,发现当除尘器引入料腿结构形式,可以有效提高方形旋风分离器的性能。李博涛等^[4]采用 CFD-DEM 耦合算法研究了在不同入口速度情况下切向旋风除尘器内部气体和粉尘流动的特性,发现随着入口速度增加,粉尘带变宽,旋转流存在不稳定情况,进一步揭示了旋风除尘器内气体和颗粒的运动规律。也有研究者建立切向旋风除尘器除尘效率数学模型,以除尘效率为目标函数对切向旋风除尘器结构尺寸进行优化设计^[5-7]。

国内学者也对轴向旋风除尘器进行了研究。马俊杰等^[8]对轴向直流式除尘器的除尘效率进行了实验分析,发现导流叶片角度、出口管道直径等参数是影响除尘效率的重要因素。王鲁平^[9]分析了直流式除尘器内部流场,得到了尺寸参数与除尘器性能之间关系,即在入口速度相同的情况下,除尘器外

[收稿日期] 2025-05-03

[基金项目] 工业烟尘污染控制湖北省重点实验室开放课题(HBIK2022-07)。

[作者简介] 张良(1980—),男,四川仁寿人,博士,副教授,主要从事钢铁冶炼粉尘流场分析与研究工作。

[引用格式] 张良.高炉轴向旋风除尘器气固流动特性分析[J].绿色矿冶,2025,41(5):74-78,116.

ZHANG Liang. Analysis of gas-solid flow characteristics in axial cyclone dust collectors for blast furnaces [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(5): 74-78, 116.

筒内径 140 mm 的颗粒分离效果优于内径 206 mm。胡伟等^[10]利用重力除尘器进口管道设计了轴向旋风除尘器,并用数值仿真分析方法,对除尘器内部流场进行了分析,得到了速度场和内部磨损分布。夏寿敏等^[11]采用 CFD-DEM 耦合计算方法分析了轴向旋风除尘器内部流场,得到了气固分离特性、进气速度、筒体直径等参数对除尘器除尘效率的影响规律。

由于轴向旋风除尘器具有占地面积小、投资少和除尘效率较高等特点,在钢铁企业高炉炼铁生产中得到大量应用,但是有关轴向旋风除尘器的除尘机理和内部流场的研究不多见。本文以某钢铁企业轴向旋风除尘器为研究对象,采用有限元模拟的方法分析除尘器内部流场,得到速度和压力的分布规律,并计算除尘效率,为尺寸优化和提高除尘效率提供理论基础。

1 轴向旋风除尘器的结构和原理

高炉炼铁工艺中,轴向旋风除尘器的整体结构呈柱状结构,含粉尘的煤气从除尘器顶部进入,粉尘灰从底部排出,净化后的煤气从顶部排出。为了使进入的煤气旋流速度更均衡,一般进气管采用对称双输入形式。煤气通过进气管进入混合室,混合室由封头与锥体组合而成,主要作用是使从两个进气管进入的煤气能沿圆周方向均匀地流进旋流除尘区。旋流除尘区是除尘器核心部分,结构为圆柱体,上部与混合室的锥体相连,两者连接处沿圆周方向设置具有一定倾斜角度的钢板,称之为旋流板,旋流板具有改变煤气流动方向,为粉尘提供切向速度的作用;下部与下部锥体相连,下部锥体内部设置有反射锥。煤气通过旋流板进入旋流除尘区,在除尘器内沿着内壁既做向下运动,又做圆周运动,呈现螺旋下降的过程。下降过程中,在离心力的作用下,粉尘会向内壁方向运动,在碰到内壁后,在自重的作用下,粉尘沿内壁螺旋降低,到达下部锥体后,通过排灰口落入排灰系统,而煤气经过下部锥体的反射锥改变方向后螺旋上升,最后通过排气管排出,进入煤气管网供进一步使用。轴向旋风除尘器工作原理如图 1 所示。

2 模型建立

轴向旋风除尘器内含尘煤气看作不可压缩的稳态等温湍流流动,根据流动控制原理,建立分析

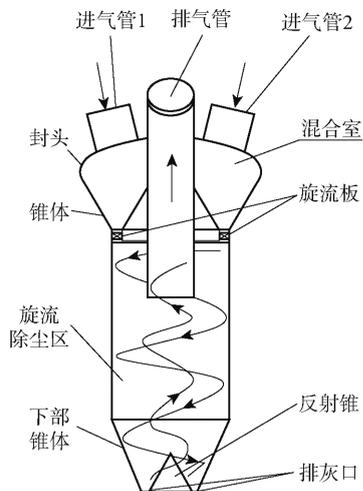


图1 除尘原理图

模型。

2.1 流体相控制方程

轴向旋风除尘器内部流场具有十分复杂的湍流,采用 N-S 方程描述高炉煤气的流动,高炉煤气的连续性方程见式(1)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \alpha_m) + \nabla \cdot (\rho_m \alpha_m u_m) = 0 \quad (1)$$

式中, ρ_m 为高炉煤气密度, $\rho_m = 1.34 \text{ kg/Nm}^3$; α_m 为煤气体积分数; u_m 为高炉煤气流速, m/s。

动量方程见式(2)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \alpha_m u_m) + \nabla \cdot (\rho_m \alpha_m u_m u_m) = -\alpha_m \nabla p + \nabla \cdot \tau - F_{pm} + \rho_m \alpha_m t g \quad (2)$$

式中, p 为高炉煤气压力, Pa; τ 为应力张量, Pa; F_{pm} 为高炉煤气与粉尘之间平均相互作用力, N; t 为时间, s; g 为重力加速度。

2.2 颗粒相控制方程

对于煤气中的粉尘,采用连续流中的离散相模型(DPM)对其运动轨迹进行预测计算。在 Lagrange 坐标系统下,对粉尘的力平衡微分方程进行积分求解而获得运动轨迹,粉尘力平衡微分方程见式(3)。

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + g_x(\rho_m - \rho)/\rho_m + F_x \quad (3)$$

其中, $F_d(u - u_p)$ 为粉尘受到的质量曳力, $F_d = \frac{18\mu}{\rho_m d_p^2} \frac{C_D Re}{24} u_p$, u_p 为煤气粉尘速度, μ 为煤气的动力黏度, d_p 为煤气粉尘的直径, C_D 为阻力系数; $g_x(\rho_m - \rho)/\rho_m$ 为重力的影响; F_x 为其他附加力。

2.3 仿真模型

以某钢铁企业轴向旋风除尘器作为研究对象,

其主要参数见表 1。

表 1 轴向旋风除尘器主要参数

参数	数值
单个进气管直径/mm	2 600
旋流板数量/个	30
旋流板倾角/(°)	45
旋流除尘区内径和高度/mm	7 000/11 500
排灰口直径/mm	3 300
排气管直径/mm	2 800

利用有限元分析软件 STAR-CCM+ 对轴向旋风除尘器进行网格划分,如图 2 所示。单元网格数为 2 483 226,节点为 9 133 723。



图 2 轴向旋风除尘器网格模型

以轴向旋风除尘器实际生产数据为仿真模型边界条件,轴向旋风除尘器入口煤气压力为 0.1 MPa,入口煤气速度 20 m/s,密度 1.2 kg/m³,动力黏度 1.591 × 10⁻⁵ kg/(m·s),煤气量 820 000 Nm³/h,入口煤气温度:200 ~ 250 °C,粉尘含量 ≤ 15 g/Nm³,粉尘粒径大小占比见表 2。

表 2 粉尘粒径大小占比

粒径大小/μm	占比/%
<25	12
25 ~ 250	70
250 ~ 1 000	15
> 1 000	3

3 结果分析

3.1 速度

有限元分析软件 STAR-CCM+ 支持多相物理建模,且含有丰富的湍流建模选项,因此,采用该软

件进行数值模拟分析,轴向旋风除尘器内部流场流动速度分布如图 3 所示。

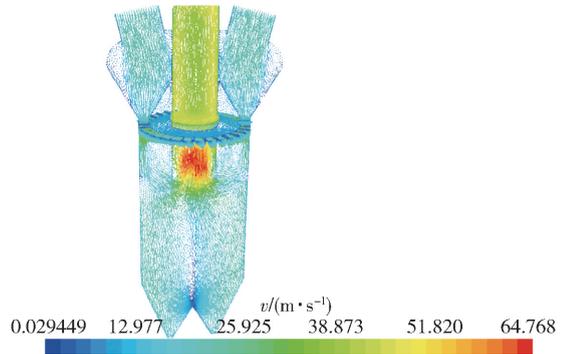


图 3 流动速度分布

从图 3 得出,煤气通过两个进气管进入混合室后,沿圆周方向均匀通过旋流板进入旋流除尘区。煤气在通过旋流板后,速度得到提高,方向发生改变,煤气气流紧贴内壁,沿内壁螺旋向下流动,在下降过程中,出现涡流现象,与文献^[1]理论分析结果一致。涡流出现在两个区域:其中一个涡流出现在排气管入口附近,含尘煤气向下运动时,经过旋流板后,压力得到释放,煤气速度提高,体积膨胀而向旋流除尘区域中心流动,与螺旋上升流动的气体发生干涉,进而形成涡流;另一个涡流出现在下部锥体的反射锥处,煤气继续旋转向下流动,与到达下部锥体后被反射锥反射的气体相互干涉而形成涡流。涡流会产生扰乱煤气的顺畅流动,影响除尘器的除尘效率。

煤气经过反射锥反射后,流动方向改变,由螺旋向下改变为螺旋上升,在排气管入口,随着压力再次释放,煤气速度进一步提高,在排气管的入口附近达到最大值 64.768 m/s,随后进入排气管中流动,速度略有降低。以排气管进口为 0 m,排气管轴心线轴向的速度变化情况如图 4 所示。

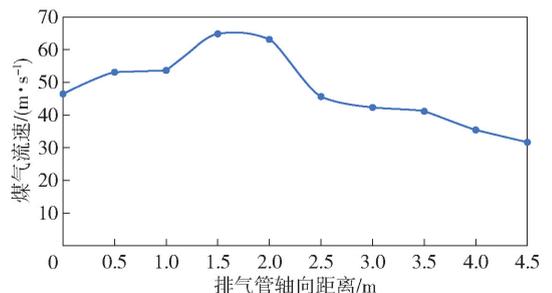


图 4 排气管轴心线轴向速度分布

同时,从图 3 可以得出,煤气在旋流除尘区流动时,除尘器轴心线所在轴心区域是煤气螺旋上升的区域,其速度最低,约为 5 m/s。随着半径增加,速

度逐渐增大,达到截面上最大值,然后缓慢降低,靠近内壁处的速度略低于最大值。截取离排气管入口1 m处横截面的径向方向速度,其分布呈现“M”型,如图5所示。

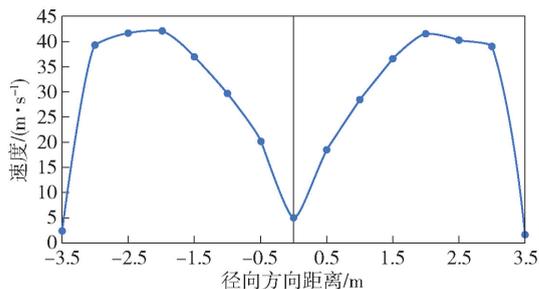


图5 旋流除尘区径向方向速度分布

除尘器顶部排气管入口处到旋流板之间的区域呈封闭状,没有气体流动。从图5可看出,少量低速气体流入这部分区域,这说明底部反射锥锥度设计合理,使螺旋上升的煤气大部分进入排气管而排出除尘器。

旋流板是轴向旋风除尘器关键部件,通过倾斜一定角度而使煤气流动方向发生改变,并且提高煤气流动速度。旋流板横截面的流动速度分布如图6所示。

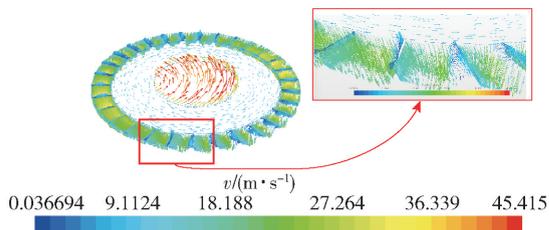


图6 旋流板截面流动速度分布

速度分布图反映了旋流板区域、排气管与旋流板之间区域以及排气管内部三个区域的煤气流动速度分布。从图6可看出,经过旋流板导向、增速后,煤气速度超过进气管入口速度,并沿除尘器内壁切向向下运动;在圆周上,有两个旋流板区域速度略高于其他旋流板,主要原因是这两个区域正对着进气管。横截面中排气管与旋流板之间的区域,是除尘器内部的顶部,是封闭区域,呈圆环状,只有少量气体进入此区域,流动速度呈较低状态。中心区域为排气管内部截面,处于排气管入口附近,大部分除尘后上升的煤气进入排气管,速度进一步得到提高,并且继续保持旋流板产生的螺旋方向,即逆时针方向,螺旋上升向外流动。

旋流板与旋流板之间形成的流场,中间部位流速比较大,达到25 m/s;靠近旋流板前表面的流速约

为9.1124 m/s,而旋流板的背表面出现逆流状态,速度约为2 m/s的煤气沿着背面向上流动,遇到向下流动的气体时又折向向下流动。从图6的局部图看出,相对于旋流板前表面,背面气体流动速度低、流量也低,这与现实中旋流板流动磨损主要出现在前表面的现象一致。

3.2 压力

轴向旋风除尘器内部压力分布如图7所示。

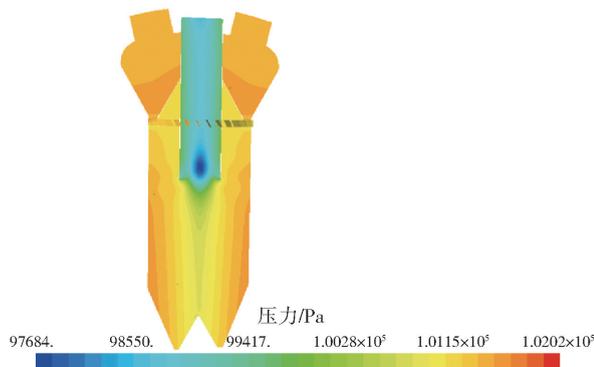


图7 压力分布

从图7可看出,压力分布主要分为三个区域。第一个区域是旋流板与进气管之间的混合室,由于旋流板具有阻力作用,煤气进入混合室混合后,压力略有提高。第二个区域是除尘器内部,经过旋流板作用,气体压力降低,能量得到释放,速度增加。在横截面上,径向方向上越靠近内壁,压力越高,而中心部位压力最小,与速度分布情况一致。在下部锥体部位,靠近排灰口附近压力也比较低。第三区域是排气管内,由于排气管直接与外部管网相接,气体体积增加,压力降低达到0.099 MPa以下。由于煤气进入排气管后仍然保持螺旋上升的运动状态,在排气管入口处出现最低压力值0.097 MPa,经过最低压力值后煤气压力逐渐升高。因此,煤气经过旋流除尘器进入排气管后,压力进一步释放,煤气速度提升。

3.3 除尘效率

旋风除尘器主要是依靠粉尘自身重力而将粉尘从气体中脱离出来,粉尘粒径越大越容易被分离。高炉冶炼产生的煤气中,粉尘粒度分布跨度大,而影响除尘效率的因素很多,粉尘直径是主要因素。

当煤气中粉尘直径大于某一临界值 $d_{\text{临}}$ 时,粉尘会完全从煤气中脱离出来,实现百分之百的除尘。当粉尘直径小于 $d_{\text{临}}$ 时,粉尘只有部分会从煤气中脱离出来。在除尘器两个进气管采用入口面射流源,送入不同直径的粉尘颗粒,比例与表2一致。粉尘入射点位置均匀分布在进气管口,两个进气管共送

入15 000 个粉尘颗粒,并对其进行追踪。

通过数值模拟仿真分析,统计排灰口捕获的粉尘颗粒数,进而计算轴向旋风除尘器对不同粒径颗粒的除尘效率,结果见表3。

表3 不同粉尘粒径除尘效率模拟结果

粒径大小/ μm	追踪粉尘 个数	捕获粉尘 个数	分级除尘 效率/%
1	550	51	9.27
2	550	89	16.18
4	550	202	36.73
5	550	376	68.36
8	550	412	74.90
10	550	528	87.09
20	550	550	100
50	550	550	100
100	550	550	100
300	550	550	100

总除尘效率^[8]见式(4)。

$$\eta = \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{\text{追踪粒子数} - \text{逃逸粒子数}}{\text{追踪粒子数}} \times \text{粒径质量分数} \right) \quad (4)$$

根据表3的结果,计算出除尘效率为83.2%,结果符合实际生产数据^[1]。

4 结论

根据离散相模型理论,采用有限元分析方法对某钢铁企业轴向旋风除尘器内部流场进行数值模拟分析。以实际生产的轴向旋风除尘器尺寸和生产参数为基础,建立轴向旋风除尘器有限元分析模型。通过数值模拟分析结果,轴向旋风除尘器煤气流动速度最大值出现在排气管内部入口处,达到64.768 m/s,并且在煤气螺旋下降过程中,两次与螺旋上升气体相互干涉而产生涡流;流场压力在除尘器内部变化不大;除尘器除尘效率,与实际除尘效率接近。本文分析为进一步尺寸优化和提高除尘效率

提供理论基础。

[参考文献]

- [1] 范小钢,黄威.高炉轴流旋风除尘器技术及应用[J].炼铁,2006,25(5):17-21.
- [2] Dzmitry Misiulia, Anders Gustav Andersson T. Staffan Lund strom. Effects of the inlet angle on the collection efficiency of a cyclone with helicalroof inlet [J]. Powder Technology, 2017, 305:48.
- [3] Fatahian E, Fatahian H. Improving the efficiency of a square cyclone separator using the dipleg-a CFD-based analysis [J]. Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-International English Edition, 2022, 41 (2): 670-681.
- [4] 李博涛,张宏图,位乐,等.基于CFD-DEM的旋风除尘器内气固流动特性研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(11):151-157.
- [5] 郝元,霍浩,代岩.旋风除尘器最优化设计及CFD数值验证[J].机械设计与制造,2018(8):33-35,40.
- [6] 熊攀,鄢曙光.基于Rosin-Rammler函数的数值模拟对旋风除尘器粒径分布规律的研究[J].粉末冶金工业,2019,29(2):29-32.
- [7] 王洋,刘毅梁,王磊,等.基于非线性规划模型的旋风除尘器设计优化[J].粉末冶金工业,2023,33(2):109-115.
- [8] 马俊杰,余敏,张宇红.用于炉内除尘的轴向直流式旋风除尘器的实验研究[J].锅炉技术,2007(3):10-13,71.
- [9] 王鲁平.直流式旋风除尘器的数值模拟与实验研究[D].北京:清华大学,2015.
- [10] 胡伟,耿云梅,陈玉敏,等.新型高炉旋风除尘器仿真分析[C]//第十二届中国钢铁年会论文集,2019:163-169.
- [11] 夏寿敏,谭志洪,刘振峰,等.轴流旋风除尘器内气固分离特性的数值模拟[J].南昌大学学报(工科版).2022,44(2):132-139,167.

Analysis of Gas-Solid Flow Characteristics in Axial Cyclone Dust Collectors for Blast Furnaces

ZHANG Liang^{1,2}

(1. School of Intelligent Manufacturing, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;

2. Hubei Key Laboratory of Industrial Fume Dust Pollution Control (Jiangnan University), Wuhan 430056, China)

Abstract: In order to obtain the internal flow, the axial cyclone dust collector of an iron and steel

(下转第116页)

Investigation and Analysis of Soil and Groundwater Status of an Abandoned Gas Station in Qinghai

YANG Guohang¹, LV Xiaojian¹, CHEN Fei², XU Dongdong¹, HAO Jianqing¹

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. Beijing Zhongdihongke Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: The legacy site of a gas station in Qinghai Province has been idle for many years after its closure, it is now planned to be developed into public facility land. According to relevant laws, regulations and policy requirements, soil and groundwater pollution investigations should be conducted on the land before its development and utilization. According to the pollution identification, preliminary investigation, detailed investigation and risk assessment results, there is petroleum hydrocarbon ($C_{10} - C_{40}$) pollution in the soil. The cause of the pollution is closely related to the long-term leakage or “running, dripping, and leaking” of oil materials in the underground oil depot. The pollution depth is 2 ~ 9 m, and the soil volume is 8 480. 29 m³. This survey and evaluation work can provide a basis for the subsequent risk control or remediation of the gas station plot, and provide effective reference for soil pollution investigation and risk assessment of similar gas station plots.

Key words: gas station; investigation of soil pollution; groundwater; risk assessment; petroleum hydrocarbons; soil remediation

(上接第 78 页)

enterprise was taken as the research object. The finite element analysis software STAR-CCM + was used to establish the analysis model of axial cyclone dust collector, and the numerical simulation analysis was carried out based on the discrete phase model theory. According to the internal velocity and pressure distribution of the axial cyclone dust collector, the velocity of the gas is increased after passing through the swirl plate, and the spiral downward movement is generated. During the descent process, there will be two eddy currents at the inlet of the exhaust pipe and the lower cone, which will affect the gas flow. The pressure distribution is mainly divided into three areas: First, the mixing chamber between the swirl plate and the intake pipe. Due to the resistance of the swirl plate, the pressure increases slightly after the gas enters the mixing chamber; second, inside the dust collector, the gas pressure is reduced by the action of the swirl plate; the third is the low pressure area in the exhaust pipe. The dust removal efficiency is 83.2%, which is close to the actual dust removal efficiency. Through the analysis of the gas-solid flow characteristics of the axial cyclone dust collector, it provides a theoretical basis for further optimizing the structure size and improving the dust removal efficiency.

Key words: blast furnace; axial cyclone dust collector; flow field; flow trajectory