

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230307

90°弯头上下游风速及颗粒物质量浓度分布特征与测量

林秀丽, 樊敏, 杨津硕, 柳静献
(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要:为解决在通风系统的非理想测试断面处难以进行通风参数的准确测量问题,基于数值模拟方法,探究了管径、风速、曲率直径比、颗粒物质量浓度、粒径、密度等因素对90°圆形弯管内气流及颗粒物质量浓度分布的影响,并分析了等面积圆环法和中心点法对非理想测试断面的测量误差及规律.结果表明:弯管内风速分布仅受曲率直径比的影响;颗粒物质量浓度受曲率直径比、粒径和密度的影响.等面积圆环法测得的弯头出口处风速误差最大值为7.8%;曲率直径比一定时,各测量断面误差同管径之间存在函数关系,管道中心风速与断面平均风速之间存在线性关系.等面积圆环法测得的弯头出入口颗粒物质量浓度误差均在10%以下.本研究可为在非理想测量断面进行风速和颗粒物质量浓度监测提供参考.

关键词:数值模拟;90°弯管;风速分布;管道风速;颗粒物质量浓度

中图分类号:TB 24 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2025)05-0113-13

Characteristics and Measurement of Air Velocity and Particulate Matter Mass Concentration Distribution in Upstream and Downstream of 90° Elbow

LIN Xiu-li, FAN Min, YANG Jin-shuo, LIU Jing-xian

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIN Xiu-li, E-mail: linxiuli@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To solve the problem of difficulty in accurately measuring ventilation parameters at non-ideal test sections of ventilation systems, based on the numerical simulation method, the effects of pipe diameter, air velocity, curvature-diameter ratio, particulate matter mass concentration, particle size, density and other factors on the airflow and particle concentration distribution in the 90° circular bend are explored. The measurement errors and rules of the equal-area ring method and the center point method on the non-ideal test section are analyzed. The results show that the air velocity distribution in the bend is only affected by the curvature-diameter ratio, and the particulate matter mass concentration is affected by the curvature-diameter ratio, particle size and density. The maximum error of air velocity at the elbow outlet measured by the equal area ring method is 7.8%. When the curvature-diameter ratio is fixed, there is a functional relationship between the error of each measured section and the pipe diameter, and there is a linear relationship between the wind speed of the pipe center and the average air velocity of the section. The particulate matter mass concentration errors of the elbow inlet and outlet measured by the equal-area ring method are all below 10%. This study can provide a reference for the monitoring of air velocity and particulate matter mass concentration in non-ideal measurement section.

Key words: numerical simulation; 90° bend; air velocity distribution; pipeline air velocity; particulate matter mass concentration

收稿日期: 2023-11-10

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFC2503201); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJKM20220352).

作者简介: 林秀丽(1974—),女,辽宁抚顺人,东北大学副教授;柳静献(1966—),男,河北元氏人,东北大学教授,博士生导师.

在工业生产中,劳动者长期过量接触颗粒物会造成健康危害,颗粒物的大量排放会造成空气污染,影响公众的身体健康.目前尘肺病仍然是我国最主要的职业病^[1],颗粒物对公众健康的影响不容忽视^[2],通风是控制颗粒物的重要技术手段.通风系统运行前和运行时需要进行系统性能测试,以确保系统风速、风量、颗粒物浓度等参数达到期望标准.对于存在弯头的管道,风管风量测量应选择在直管段上,且距上游弯头不应小于5倍管径,距下游弯头不应小于2倍管径.然而在生产现场进行通风测试时,大量存在由于空间限制难以找到合适测量断面的现实问题.因此,如何在非理想测试断面测试时得到较准确的测试结果,是迫切需要解决的问题.

在通风系统风速测量方面,学者从提高风速测量效率、减小测试误差的角度进行了研究.刘殿武^[3]根据巷道内最大风速和平均风速之间存在的线性关系,得到了可以简化风速测量的速度场系数曲线.Gładyszewska-Fiedoruk等^[4]建立了圆管内湍流的速度分布数学模型,用来描述平行于风管轴线方向的气流.Ostrowski等^[5]利用皮托管在管道截面多点测量,得到了中心风速和断面平均风速的校正系数,实现了单点测量断面平均风速.Care等^[6]通过实验发现圆形管道不同断面处风速的最大测量误差是测量点数、次数和距离局部管件无量纲距离的函数,距离局部管件越近,测点数对误差结果影响越大.Care等^[6]采用数值模拟的方法总结出不同测点下矩形弯管下游不同断面处风速测量的最大误差,为矩形弯管下游的风速测量提供了参考,但可参考最大误差较大.

在通风系统颗粒物浓度测量方面,学者就颗粒物浓度监测方法展开研究,探索出了采样称重法^[7-8]、光散射法^[9-11]、 β 射线法^[12]和电荷法^[13]等颗粒物浓度测量方法.采样称重法测量管道颗粒物浓度最准确,但该方法需要在多点手动采样,无法完成长周期的实时监测.有学者就粉尘浓度的实时监测方法展开研究.梁艳等^[12]基于 β 射线法研制了 $PM_{2.5}$ 的在线监测系统,系统采用原位检测法,解决了滤膜在采样室和传感器之间移动带来的误差.Ribalko等^[14]介绍了IVA-L仪器,通过测量固体颗粒在除尘器进出口断面的激光散射,实现了工业条件下粉尘浓度的持续监测.Abou Khousa等^[15]设计了一种基于微波的颗粒物在线测量系统,发射探头和接收探头相对安置在管道断面两侧,通过对信号进行分析得到断面颗粒物

浓度.李立等^[16]研发了一种颗粒物在线测量系统,管道内气体和颗粒物经采样喷嘴进入系统,该装置可以对高压天然气管道内颗粒物进行在线检测.

由文献可以看出,关于管道内风速和颗粒物浓度监测的探究多集中在创新测量方法和提升测量精确度两方面,缺少测试条件不能达到规定标准时,弯管风速和颗粒物浓度测量误差的研究.分析局部管件内流场和颗粒物运动特征,获得管件上下游风速和颗粒物分布规律,对于推动非理想测点通风测试工作顺利进行,提高测试结果的准确性具有重要意义.

本文利用数值模拟方法,研究影响 90° 圆形弯管内气流及颗粒物运移情况的因素,并以此为基础分析通风管道内非理想测试断面下风速和颗粒物浓度的测量误差及校正方法,为非理想测点通风测试工作提供指导.

1 数值模拟方法

1.1 几何模型的建立

几何模型为圆形断面 90° 弯管,由弯头上游直管段、弯头和弯头下游直管段3部分组成,弯管几何模型如图1所示.其中,弯头上游直管段和下游直管段长 $10D$ (D 为管径),原点 O 位于弯头上游直管段入口水平面上, XOY 坐标平面位于弯头上游直管段入口水平面上, Z 轴过原点且垂直于 XOY 平面. θ 为极角,弯头入口断面处 $\theta=0^\circ$,弯头出口断面处 $\theta=90^\circ$.

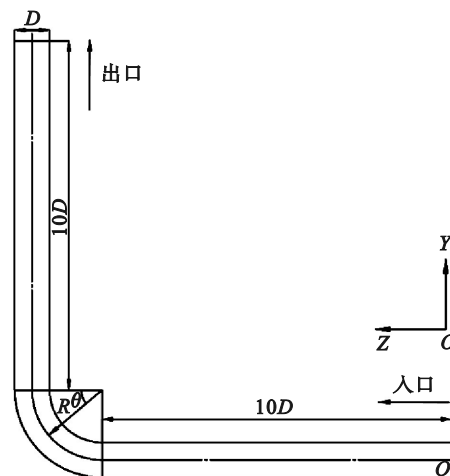


图1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

1.2 网格划分

几何模型的网格划分采用六面体网格,考虑到边界层对求解结果的影响,对边界层网格进行加密,网格划分结果见图2,网格质量为0.7.

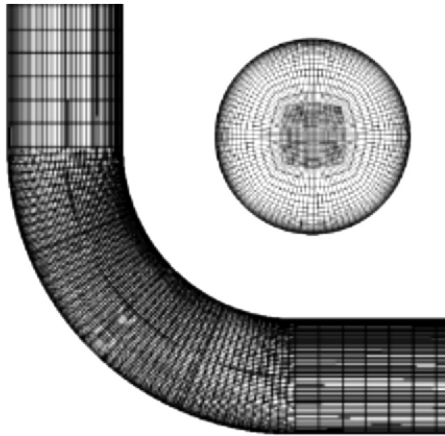


图2 几何模型网格划分图

Fig. 2 Geometric model meshing diagram

1.3 边界条件及求解器设置

弯头上游直管段进口为速度入口,方向垂直于入口壁面,颗粒物由入口注入,入射速度与风速一致;弯头下游直管段出口为自由出流;壁面采用无滑移壁面,边界条件为trap,弯管内温度为293 K.

求解采用SIMPLE(压力耦合方程的半隐式方法)算法,对流项离散格式为二阶迎风格式,压力插值格式为Second-Order.

1.4 数值模型的选择

根据Sudo等^[17]的实验,在雷诺数相等的情况下,采用k-epsilon模型中的standard模型、realizable模型和RNG(re-normalization group)模型进行对比模拟,雷诺数 $Re=60\ 000$.图3为不同湍流模型下YOZ平面与不同断面交线上监测点实际风速与断面平均风速比值(W/U_0)的数值模拟结果与实验结果的对比图,包括 $Z/D=-1, -0.5, \theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, Y/D=0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 10$ 这14个有代表性断面,图上侧为弯头曲率中心所在的一侧.可以看出,不同湍流模型与实验曲线拟合情况良好,曲线之间不存在显著偏差.根据Kim等^[18]提出的湍流模型预测情况评价法,选取命中率高的湍流模型进行后续模拟,standard模型无论是弯头出入口处还是距弯头出口5倍管径处,在对风速分布的预测方面都存在明显优势,因而用standard模型进行后续模拟研究.

考虑到气流和粉尘的相互作用,粉尘在管道内运动的模拟采用双向耦合的离散相模型,颗粒物与空气之间不存在明显温差,因此颗粒物受力考虑重力、虚拟质量力、压力梯度力和萨夫曼升力.

1.5 网格无关性检验

确定了5种网格数量对各个模型进行网格无

关性检验.以管径为500 mm,曲率直径比为2.0的弯管模型为例,取弯头出口断面处X轴和Z轴,在轴线不同位置取50个点进行速度监测(见图4).可以看出,网格数量大于40万时,X轴上速度随网格数量变化不明显;Z轴上弯头内侧不同网格数量下的速度存在较大差异,但随网格数量增加,误差也逐渐减小.综合考虑计算精度和计算速度之后,选取网格数量为937 861的模型进行后续模拟.

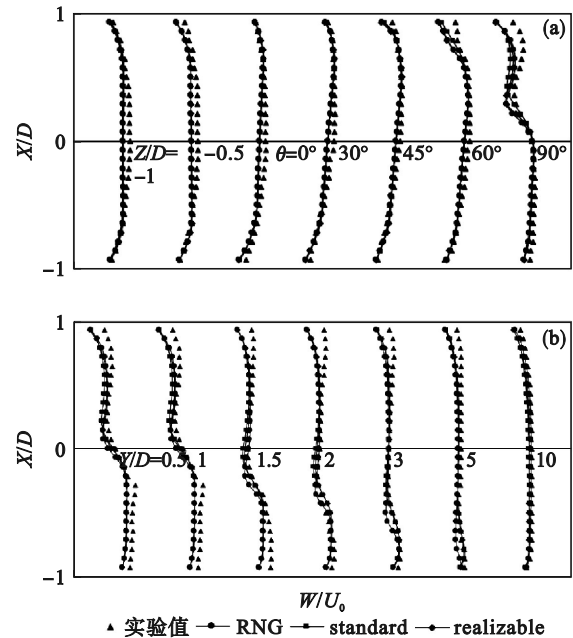


图3 典型断面处实验值与模拟值比较

Fig. 3 Comparison of experimental and simulated values at a typical cross section

(a)— $Z/D=-1, -0.5, \theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$;

(b)— $Y/D=0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 10$.

2 模拟结果及分析

2.1 速度对气流及颗粒物运移的影响

令弯头入口处 $Z=0$,弯头出口处 $Y=0$,分别设立 $Z=-2D$ (弯头前2倍管径), $Z=-1D, Z=-0.5D, Z=0$ (弯头入口), $\theta=22.5^\circ, \theta=45^\circ, \theta=67.5^\circ, \theta=90^\circ$ (弯头出口), $Y=0.5D, Y=1D, Y=2D, Y=4D, Y=6D, Y=10D$ (弯管出口)14个断面以观察管内流参数,断面位置如图5所示.

在实际通风过程中,为防止粉尘沉积,水平通风除尘管道的风速通常在10~20 m/s,考虑到低入口风速对风速分布的影响,本研究将入口风速设定为5, 16, 18, 20 m/s,当颗粒物粒径为5 μm ,曲率直径比为2.0时,各个断面的风速分布云图

如图 6 所示,图中截面上部为远离弯管转弯中心的外壁,下部为靠近弯管转弯中心的内壁.

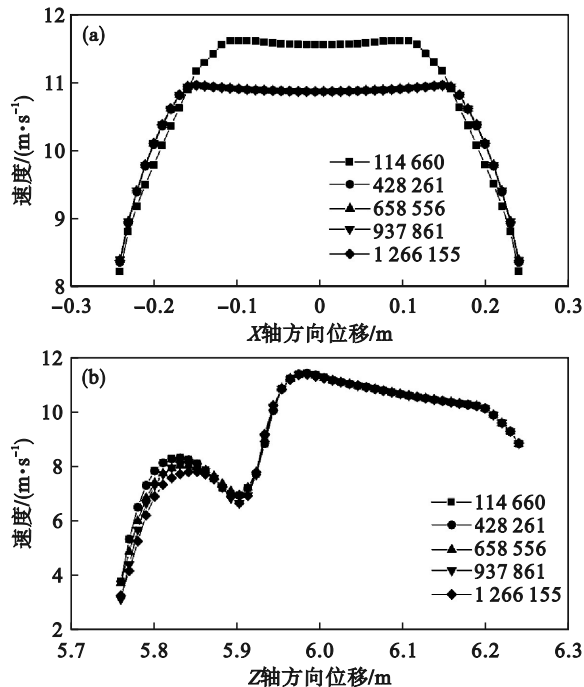


图 4 网格数量对计算结果的影响

Fig. 4 The effect of the number of meshes on the calculation result

(a)—X轴方向位移; (b)—Z轴方向位移.

模拟结果显示,在弯头上游,直管段与弯头入口距离大于 $0.5D$ 时,风流不受弯头影响,风速分布形如同心圆环,风速由管道中心沿径向逐渐减小;与弯头入口距离等于 $0.5D$ 时,弯管预效应产生了压力梯度,这使得原本处于管道中心的速度极大值向靠近内壁的一侧略偏移,风速分布出现分层现象,在弯头入口处,这种偏移变明显;随着气流进入弯头部分,压力梯度使得风速分布呈现的分层现象更加明显,在弯管 $\theta=22.5^\circ$ 时达到峰值;在弯管 $\theta=45^\circ$ 处,弯管内壁附近出现小部分低速区域,并且随着流动的发展,低速区域逐渐向管道中心移动,在内壁和管道中心之间形成凹陷;随着风流远离弯头,凹陷部分进一步向远离转弯中心的外壁移动,速度峰值又重新回到管道中心,风速分布逐渐变回同心圆环,然而在 $Y=10D$ 处,风速分布仍受弯头影响,未能完全恢复.

随着风速的增大,风速分布没有出现明显变化,仅二次流速度有所增大,证明风速大小对风速分布无影响,并且相比于弯头上游,弯头对下游的影响距离更长,因此,在寻找合适的风速测量位置时,应优先考虑弯头上游.

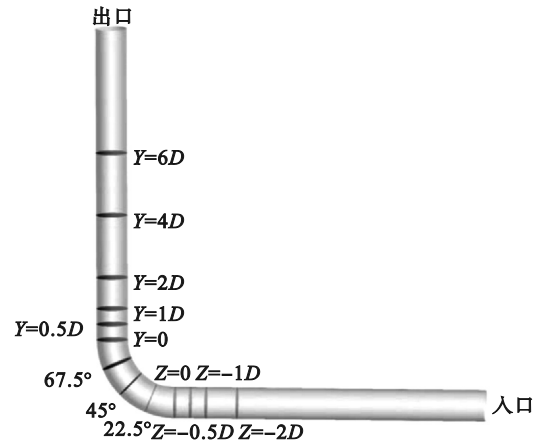


图 5 不同断面位置图

Fig. 5 Position diagram of different sections

速度变化对于颗粒物质量浓度分布影响的模拟结果见图 7,颗粒物粒径为 $5 \mu\text{m}$ 时,风速对小颗粒存在携带作用,颗粒物的运移规律与气流分布一致,弯头上游颗粒物在管道内均匀分布,弯头及弯头下游颗粒物向高风速一侧积聚,随着风速增加,这种携带作用逐渐明显.

2.2 颗粒物粒径对气流及颗粒物运移的影响

模拟了风速为 16 m/s ,颗粒物粒径分别为 $2.5, 10, 25$ 和 $50 \mu\text{m}$ 时的风速分布及颗粒物质量浓度分布,颗粒物粒径变化并未对风速分布产生影响.

不同粒径下颗粒物分布云图如图 8 所示,当颗粒物粒径小于 $25 \mu\text{m}$ 时,随着粒径增加,离心力逐渐增大,这使弯头低风速区域的颗粒物浓度逐渐减小;粒径为 $25 \mu\text{m}$ 时,离心力进一步增大,弯管内壁一侧的颗粒物质量浓度趋近于 0.与此同时,重力开始对颗粒物产生影响,颗粒物有向重力方向一侧积聚的趋势;粒径大于 $25 \mu\text{m}$ 时,重力对颗粒物分布的影响更加明显,颗粒物在弯头上游就开始向重力方向发生偏移,到达弯头时,由于重力和离心力的叠加影响,颗粒物积聚于弯管外壁和重力方向一侧,在弯头下游距离弯头出口 $1D$ 处就已经全部沉积.

在实际生产现场中,颗粒物不会以单一粒径的形式存在,因此选取不同粒径的颗粒物,模拟颗粒物在多分散相情况下的浓度分布.DPM 模型提供了几种粒径分布的函数,其中常用的是 Rosin-Rammler 分布,本文选取了 1 组小颗粒的粒径分布和 1 组大颗粒的粒径分布进行研究.

根据文献[19]的颗粒物粒径分布进行小颗粒多分散相浓度分布模拟,其中最小时径为 $1.5 \mu\text{m}$,最大粒径为 $15 \mu\text{m}$,中位径为 $9.69 \mu\text{m}$,传播系数

为 2.48, 粒径组数目为 20. 大颗粒为某燃气电厂燃烧物, 最小粒径为 10 μm , 最大粒径为 300 μm , 中

位径为 62 μm , 分布指数为 0.946, 粒径组数目为 6. 多分散相下颗粒物分布云图如图 9 所示.

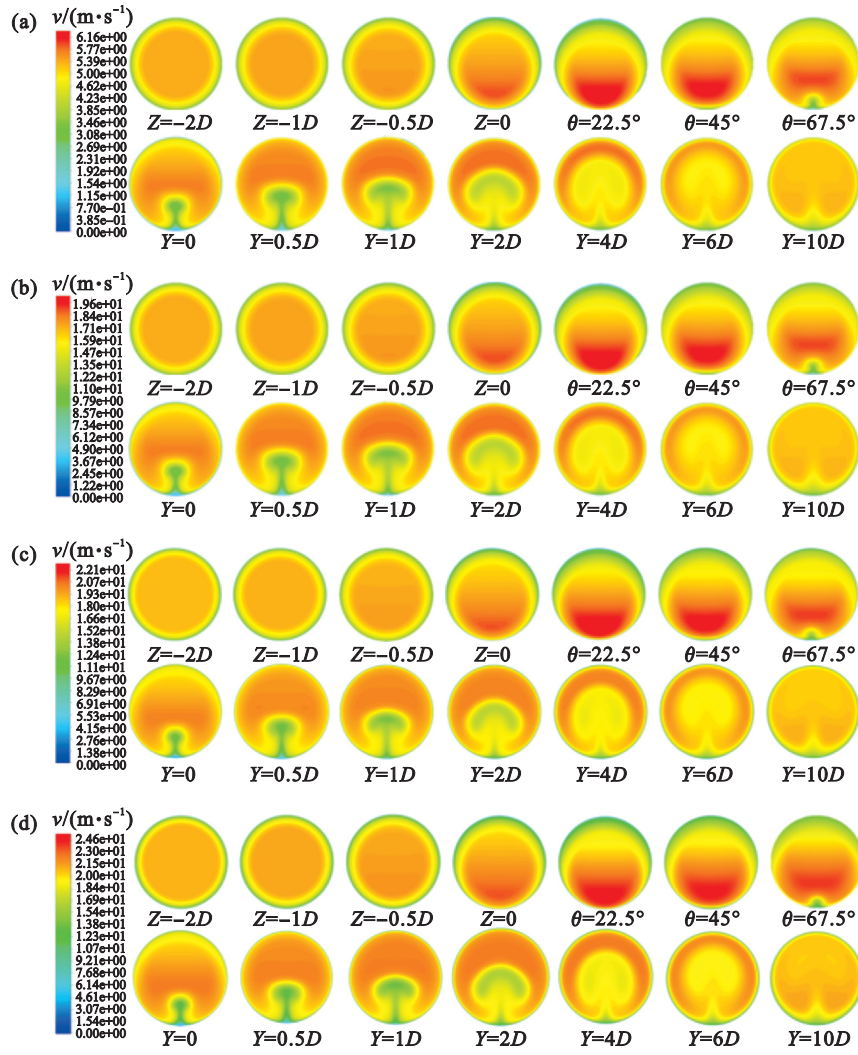


图 6 不同入口风速下截面风速分布

Fig. 6 Sectional air velocity distribution at different inlet air velocities

(a)—5 m/s; (b)—16 m/s; (c)—18 m/s; (d)—20 m/s.

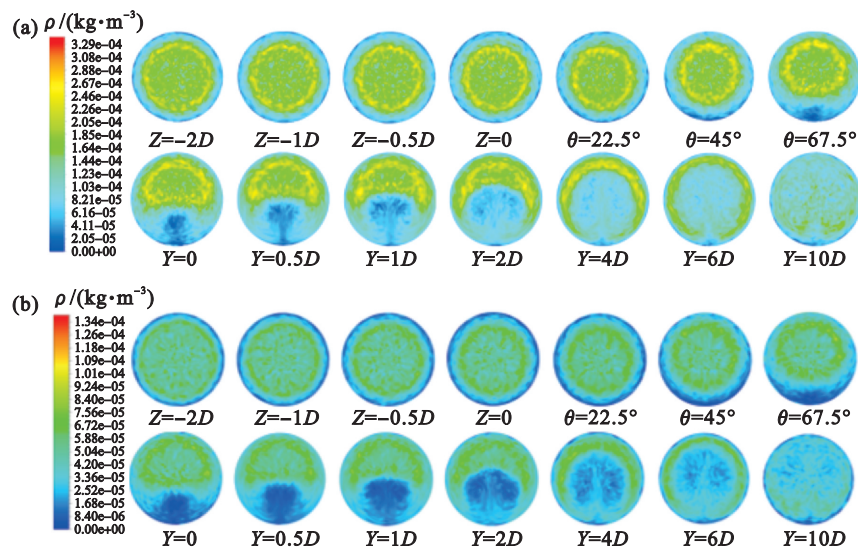


图 7 不同入口风速下截面颗粒物质量浓度分布

Fig. 7 Sectional mass concentration distribution of particles at different inlet air velocities

(a)—5 m/s; (b)—16 m/s.

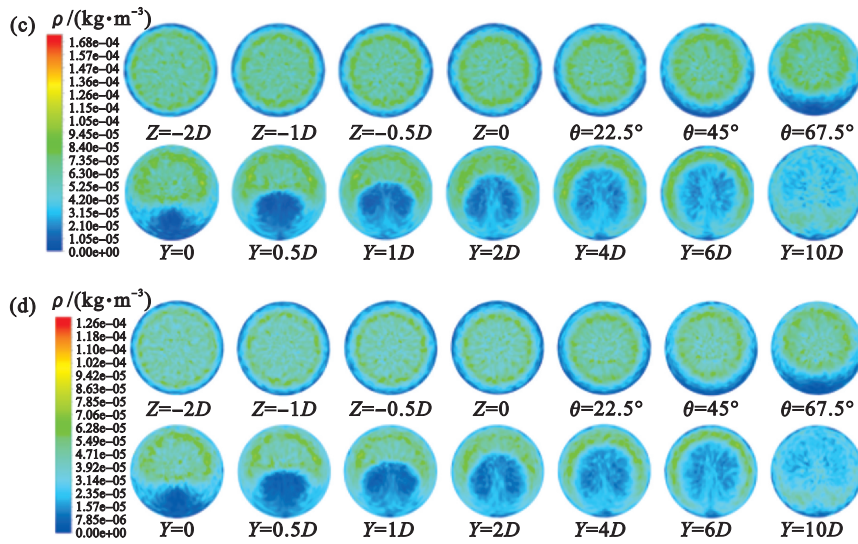


图7 不同入口风速下颗粒物质量浓度分布

Fig.7 Particulate matter mass concentration distribution at different inlet velocities
(a)—5 m/s; (b)—16 m/s; (c)—18 m/s; (d)—20 m/s.

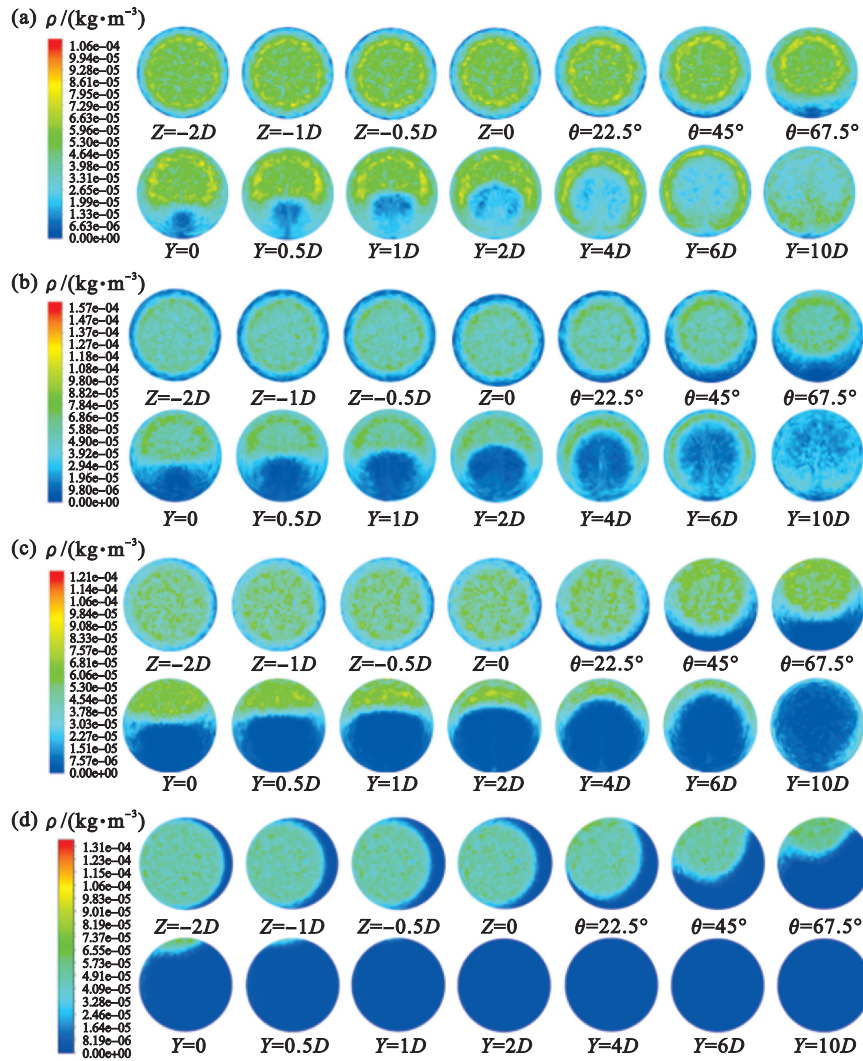


图8 不同粒径下颗粒物质量浓度分布

Fig. 8 Particulate matter mass concentration distribution under different particle sizes
(a)—2.5 μm ; (b)—10 μm ; (c)—25 μm ; (d)—50 μm .

在同一比例尺下,中位径为 9.69 μm 的多分散相与 10 μm 颗粒物质量浓度分布基本一致,多分散相颗粒中位径的大小在一定程度上决定了颗粒物质量浓度分布情况.中位径为 62 μm 时,大颗粒对小颗粒有携带作用,在弯头上游,小颗粒

不再跟随气流运动,而是像大颗粒一样受重力影响向重力方向偏移,同时,这种携带作用也加快了大颗粒的沉积速度,大颗粒在弯头出口处之前就全部沉积,弯头下游的小颗粒失去大颗粒的携带作用后,又开始随着气流运动.

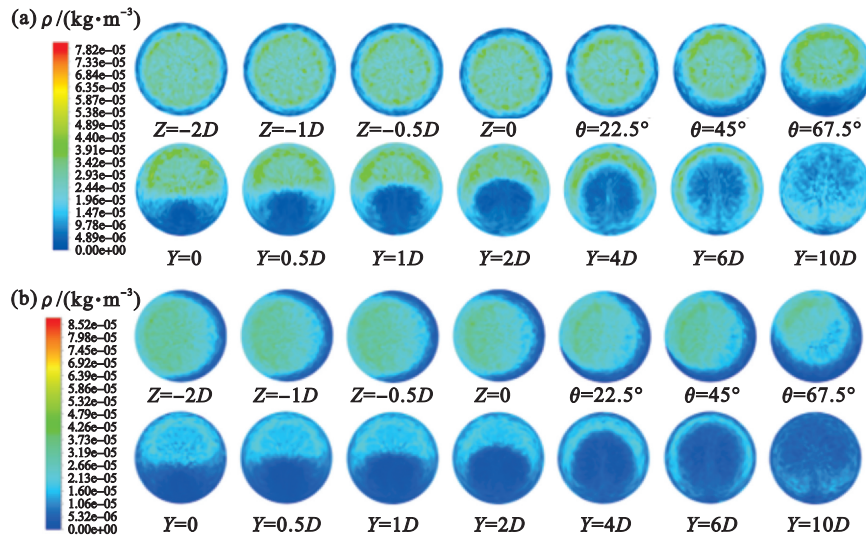


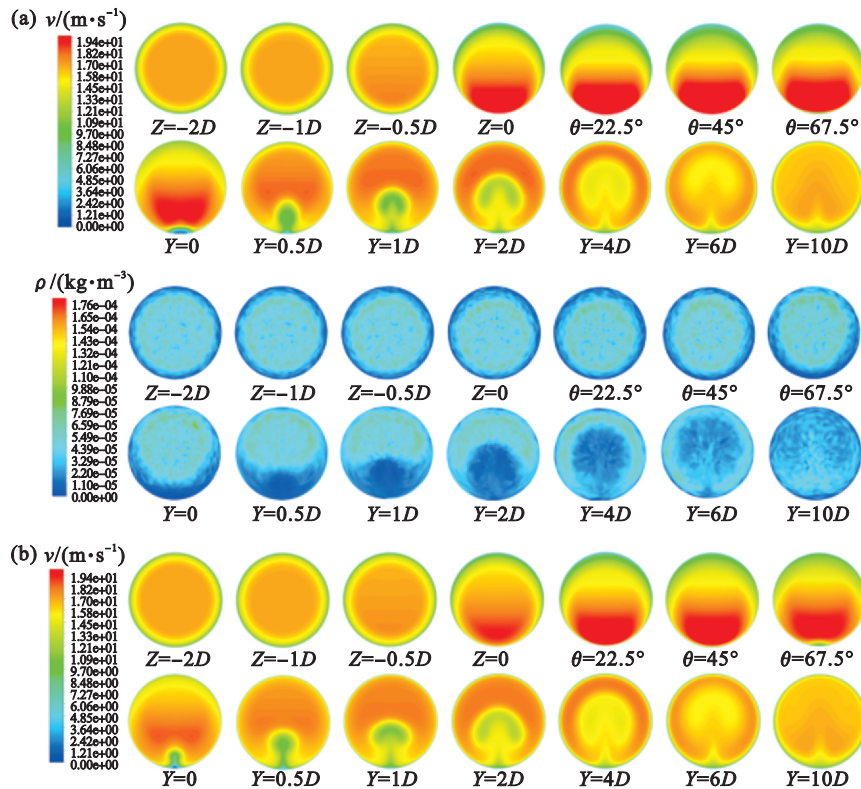
图 9 多分散相下颗粒物质量浓度分布

Fig. 9 Particulate matter mass concentration distribution under polydisperse phases
(a)—中位径=9.69 μm ; (b)—中位径=62 μm .

2.3 曲率直径比对风速及颗粒物运移的影响

取风速为 16 m/s,颗粒物粒径为 5 μm ,曲率直径比分别为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0,模拟得到不

同曲率直径比下风速跨度在 0~20 m/s 时风速分布和颗粒物质量浓度分布,见图 10.



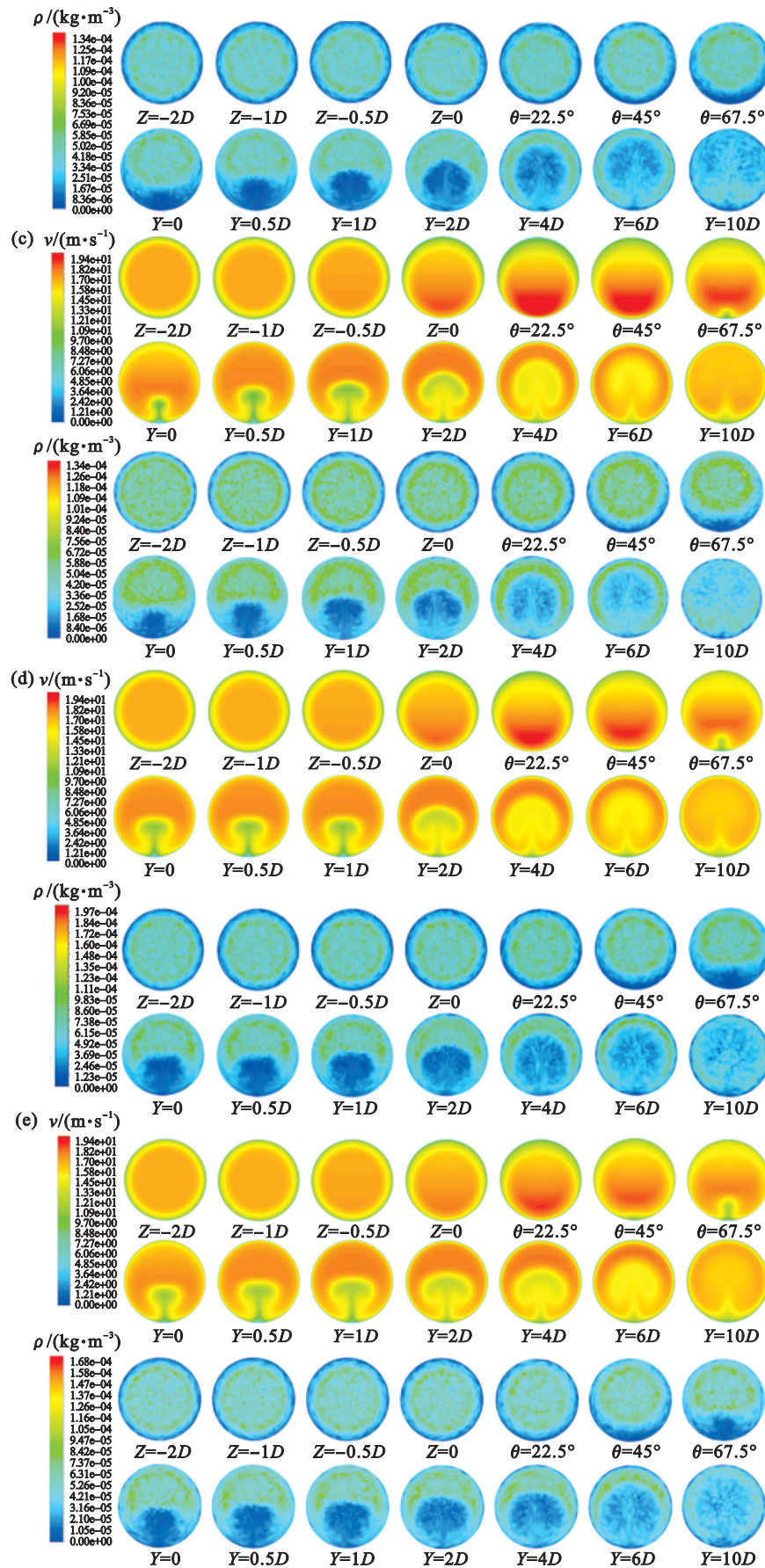


图 10 不同曲率直径比下的风速和颗粒物质量浓度分布

Fig. 10 Air velocity and particulate matter mass concentration distribution under different curvature-diameter ratios

(a)—1.0; (b)—1.5; (c)—2.0; (d)—2.5; (e)—3.0.

随着曲率直径比的增加,弯头上游的风速梯度逐渐减小,弯管内侧与管道中心之间的低速区域出现得越来越早,当曲率直径比为1.0时,低速区域在弯头出口处出现,当曲率直径比增加到3.0时,低速区域在断面 $\theta=45^\circ$ 时就已经出现,区域范围明显变大;同时,弯头对于弯头下游的影响距离逐渐缩短,当曲率直径比为3.0时,弯头出口处除了管道内壁小部分地区,整体风速分布接近同心圆环.由于小颗粒对气流的跟随性较强,曲率直径比对颗粒物质量浓度分布的影响主要通过风速分布的变化来体现,颗粒物质量浓度分布方式与风速分布一致.

综上,对于圆形弯管,曲率直径比是影响其流场分布的主要因素.当曲率直径比一定时,风速和颗粒物参数对流体流动的影响微乎其微;由于风流对颗粒物的携带作用,颗粒物质量浓度分布与风速一样,受曲率直径比的影响,除此之外,颗粒物粒径也会影响颗粒物质量浓度分布.

因此,若获得弯头在出、入口处的风速值和颗粒物质量浓度值的测试误差及其分布规律,即可通过校正解决非理想测量断面情况下风速和颗粒物质量浓度测量不准确的问题.

3 非理想测量断面下风速和颗粒物质量浓度测量

3.1 非理想测量断面下的风速测量

3.1.1 等面积圆环法

本研究以等面积圆环法为基础,将弯头出入口断面和理想断面下的等面积圆环法测量值与实际值进行对比,分析测量风速与实际风速之间的区别.取弯管4个典型断面:弯头上游距弯头入口 $2D$ 的理想测量断面、弯头入口、弯头出口、弯头下游距弯头出口 $6D$ 的断面,同心圆数量设置为4.

管径为0.5 m,风速为5~20 m/s,曲率直径比为2.0时,等面积圆环法测得的风速与断面平均风速之间的误差如图11a所示.可以看出,风速变化并未对测量误差产生明显影响,弯头出口风速误差始终稳定在5.5%左右,距离弯头出口 $6D$ 风速误差稳定在1.1%左右,弯头入口风速误差稳定在-1.9%左右,距离弯头入口 $2D$ 风速误差稳定在-0.7%左右,误差浮动范围不超过0.2%,可以忽略不计.

图11b是圆管管径为0.5 m,风速为16 m/s时,不同曲率直径比下的风速误差.可以看出,曲率直径比是影响风速误差的主要因素.随着曲率直径比的变化,弯管上下游理想断面的误差始终

小于3%,距离弯头入口 $2D$ 处的误差最小,均在-0.7%左右;弯头入口处的误差在曲率直径比为1.5时最大,为-2.3%,随着曲率直径比增大,误差绝对值逐渐减小;弯头出口处的误差较大,在曲率直径比为1.5时达到7.4%.但随着曲率直径比的增大而减小,当曲率直径比大于3.0时,测量误差也降低至3%以下.可以认为,当测量位置选在理想断面或弯管曲率直径比大于3.0时,利用等面积圆环法可以得到断面平均风速的准确值,只需对曲率直径比小于3.0时非理想测量断面下的测量结果进行校正.图11c是在曲率直径比为2.0,风速为16 m/s时,不同管径下的风速误差.可以看出,弯头出口处误差较大,在5%~7%之间;其次为弯头入口处,误差在2%~3.5%之间;当管径小于0.5 m时,管径变化会影响等面积圆环法的测量误差,管径变化引起的风速测量误差范围不超过3%,当管径大于0.5 m时,管径变化导致的误差变化逐渐消失,不同断面的误差趋于稳定.

实际测试中,曲率直径比和管径具有确定性,且对风速分布影响较大,本文总结了不同曲率直径比和管径下的测量误差,曲率直径比取1.0~3.0,管径取0.1,0.2,0.4,0.5,0.7,1,2和3 m,计算风速为16 m/s.弯头入口和出口处利用等面积圆环法测量的风速与实际风速的误差结果见图12a和12b.曲率直径比一定时,管径和风速误差之间存在函数关系,图12给出了风速误差的拟合曲线.由图12a可知,弯头入口处测量误差随着管径和曲率直径比的增大而逐渐减小,曲率直径比为1.0时,随着管径增加,测量误差从5%逐渐减小为2%;曲率直径比 ≥ 1.5 时,误差均在4%以下,且管径为1 m以下时,误差随管径的变化较大,管径大于1 m时,误差趋于稳定,均处于1%至2.5%之间.由图12b可以看出,曲率直径比为1.0时,弯头出口断面的管径和风速误差之间不存在明显的函数关系,不过此曲率直径比下的风速误差均小于5%,在可接受范围内;曲率直径比为1.5时,误差均在6%~8%之间,弯管直径小于0.5 m时误差分布变化较大,管径大于0.5 m时,误差随管径的增大而减小,弯头出口断面管径和风速误差的函数关系仅适用于管径大于0.5 m的情况,直接将等面积圆环法测量得到的风速误差视为6%也可以得到符合实际情况的断面风速;曲率直径比为2.0时,除管径小于0.5 m时误差处于5%~7%之间外,管径大于0.5 m后,管径的增加对误差影响不大,均为5.5%左右;曲率直径比为2.5

和 3.0 时,测试误差均在 2%~5% 之间,且在管径大于 1 m 后保持稳定值。

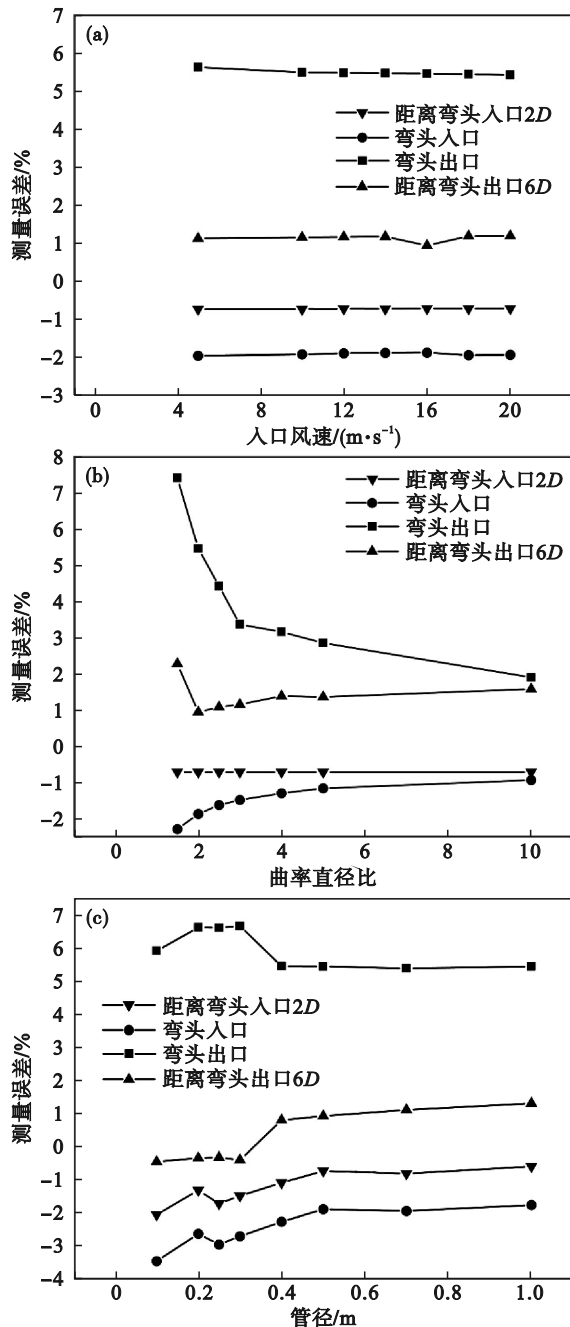


图 11 不同条件下等面积圆环法的测量误差
Fig. 11 Measurement error of equal area doughnut method under different conditions

(a)—入口风速变化; (b)—曲率直径比变化;
(c)—管径变化。

综上,要得到实际的断面平均风速,首先利用等面积圆环法初步测量,然后根据管径和曲率直径比,从图 12 中选择合适的拟合曲线,得到测量风速与实际风速的误差,通过测量值和误差计算得到实际风速。

3.1.2 中心点风速法

在实际生产中,随着数字化技术的发展,在

固定位置对风速进行实时监测的需求增加,寻找单点与断面平均风速之间的关系十分必要.本文模拟了管径为 0.5 m,曲率直径比为 2.0,风速为 5~20 m/s 时的风速分布,发现管道中心风速与断面平均风速之间存在线性关系,管道中心风速始终大于断面平均风速.弯头入口和出口处管道中心风速与断面平均风速的偏差占断面平均风速的 10% 左右,距弯头入口 2D 处占 7% 左右,距弯头出口 6D 处占 2% 左右,因此需要对中心风速进行校正才能得到断面平均风速.不同断面处两者之间的拟合结果如图 13 所示,中心点风速乘以相应的校正系数就可以得到断面平均风速,校正后风速与实际风速最大误差不超过 2%.需要注意的是,校正系数受管径和曲率直径比的影响,不适用于所有管道参数.在实际风速监测中,可以先用等面积圆环法,计算不同风速下的断面的实际风速,再测量管道中心风速,将中心点的风速与实际风速拟合,得到两者之间的校正系数,这样只需监测管道中心点风速即可实现对断面平均风速的监测。

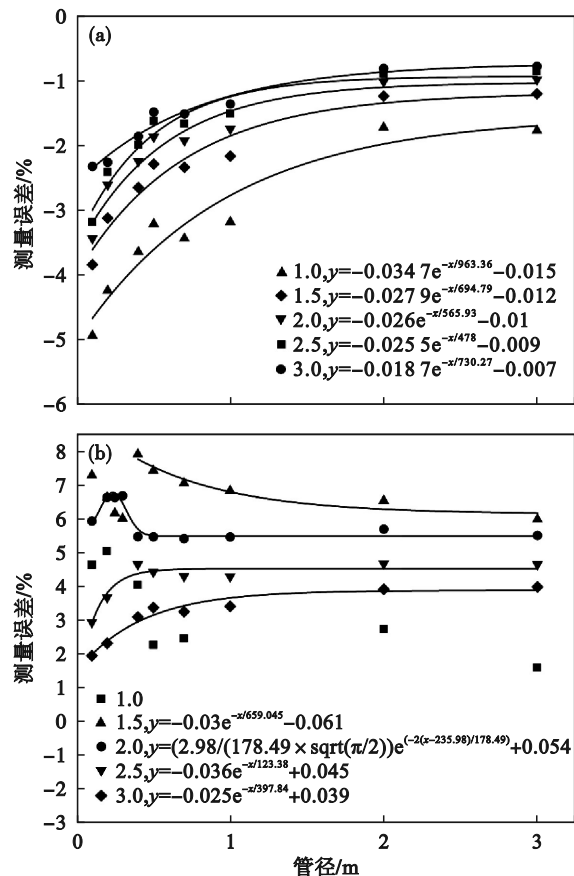


图 12 不同曲率直径比下弯头进出口处风速误差拟合曲线
Fig. 12 Wind speed error fitting curves at the inlet and outlet of the elbow under different curvature-diameter ratios

(a)—入口断面; (b)—出口断面。

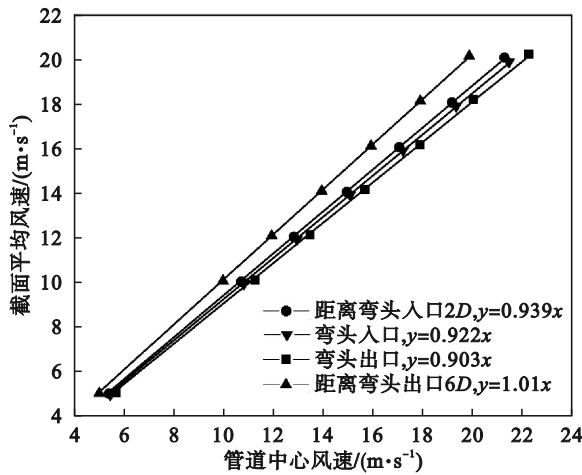


图 13 不同断面管道中心风速与平均风速的拟合曲线
Fig. 13 Fitting curves of central wind speed and average wind speed of different sections of the pipe

3.2 非理想测量断面下的颗粒物质量浓度测量

本文考虑了风速和颗粒物粒径、密度、质量浓度、曲率直径比和管径等因素对弯管颗粒物分布的影响,得到 18 种情况下,距离弯头上游 0, 2D 和距离弯头下游 0, 2D, 4D, 6D 断面的测量结果,具体参数见表 1.其中,初始参数为管径 0.5 m,曲率直径比 2.0,风速 16 m/s,颗粒物粒径 5 μm,颗粒物密度 3.5 g/cm³,颗粒物质量浓度 50 mg/m³.研究发现,常规等面积圆环法在测量颗粒物质量浓度时,测量误差不存在明显规律,且局部位置误差较大,因此采用对等面积圆环增加 2 倍的加密方式,对比测量误差是否减少.

两种条件下测量结果和测量结果与实际结果之间的误差(实际值与测量值之差占实际值的

百分比,简称“误差”)如表 1 所示.可以看出,利用未加密的等面积圆环法测颗粒物浓度时,在弯头上游,距离弯头入口 2D 处的最大误差为 11.5%,出现在曲率直径比 2.0 条件下,在弯头入口处的最大误差为 9.2%,出现在曲率直径比 2.5 条件下;在弯头下游,弯头出口处的最大误差为 8.9%,出现在粒径 25 μm 条件下,距离弯头出口 2D 处最大误差为 -9.8%,出现在曲率直径比 1.5 条件下,距离弯头出口 4D 处的最大误差为 8.1%,出现在曲率直径比 1.5 条件下,距离弯头出口 6D 处的最大误差为 11.6%,出现在风速 18 m/s 条件下.可见加密前,在弯头上游,曲率直径比是导致颗粒物质量浓度测量误差较大的原因,曲率直径比为 2.0~3.0 范围内的误差均 >5%,同时,导致弯头下游颗粒物质量浓度测量误差较大的原因较复杂,既有曲率的影响,也有颗粒物粒径和密度的影响.

利用加密的等面积圆环法测颗粒物质量浓度时,在弯管上游,距离弯头入口 2D 处的最大误差为 5.1%,出现在曲率直径比 2.0 条件下,在弯头入口处的最大误差为 -5.0%,出现在颗粒物密度 2.0 g/cm³ 条件下;在弯头下游,弯头出口处的最大误差为 13.8%,出现在粒径 25 μm 条件下,距离弯头出口 2D 处最大误差为 -12%,出现在曲率直径比 1.5 条件下,距离弯头出口 4D 处的最大误差为 -5.4%,出现在管径 0.2 m 条件下,距离弯头出口 6D 处的最大误差为 14.8%,出现在曲率直径比 3.0 条件下.与未加密测量法相比,除了弯头入口和距离弯头出口 6D 断面之外,最大误差出现的条件并未发生改变,且加密不一定能减小最大误差.

表 1 两种等面积圆环法的测量误差

Table 1 Measurement error of two equal area ring methods

参数		等面积圆环法												%
		与弯头入口						与弯头出口						
		距离		距离		距离		距离		距离		距离		
		0	2D	0	2D	4D	6D	0	2D	0	2D	4D	6D	
风速 m·s ⁻¹	18	0.7	2.1	2.9	-7.1	-2.0	11.6	-0.4	0.3	-5.5	-2.5	-0.9	3.1	
	20	2.4	1.0	0.2	-7.2	0.6	3.5	0.0	0.0	-3.7	-0.5	0.9	5.9	
粒径 μm	2.50	-2.9	-6.2	1.8	-8.0	3.3	3.1	0.5	-1.3	0.1	-5.6	-1.0	8.2	
	9.69	5.9	5.0	-3.5	-4.1	-2.0	5.7	1.6	1.1	-3.9	-1.8	-1.6	3.3	
	10.00	3.0	1.5	-3.6	-3.0	0.9	4.5	1.8	-1.5	0.2	2.6	-1.6	1.4	
颗粒物密度 g·cm ⁻³	25.00	0.9	2.1	8.9	9.0	-0.5	-6.3	1.2	-0.3	13.8	1.5	-4.1	-9.6	
	2.0	3.2	0.1	1.1	-4.0	-1.1	7.9	-5.0	-0.7	0.7	-1.9	1.7	4.7	
颗粒物质量浓度 mg·m ⁻³	0.6	-8.5	1.4	3.1	-3.5	2.4	1.2	-0.7	-0.6	-1.5	-2.3	0.2	1.8	
	10	3.4	-2.2	-3.5	-4.2	-2.4	5.4	4.3	-1.2	-3.9	-1.9	1.4	5.8	
	20	2.3	0.0	1.2	-4.7	-3.6	3.0	-2.2	0.6	-0.9	-2.7	-3.3	2.9	

续表 1

参数	等面积圆环法						加密等面积圆环法						
	与弯头入口 距离		与弯头出口 距离				与弯头入口 距离		与弯头出口 距离				
	0D	2D	0D	2D	4D	6D	0D	2D	0D	2D	4D	6D	
曲率直径比	1.0	3.4	0.5	-5.9	-3.4	2.8	5.9	0.0	0.0	2.7	-1.9	2.2	5.5
	1.5	4.6	0.2	-0.6	-9.8	8.1	4.8	-0.9	-3.2	0.1	-12	-0.9	6.5
	2.0	6.0	11.5	3.6	-4.1	-2.5	6.8	-2.1	5.1	-2.9	-4.0	-1.4	1.9
	2.5	9.2	9.3	-6.5	-3.8	-7.0	-0.2	0.8	1.1	-1.5	0.9	-1.1	-7.0
	3.0	6.2	-6.3	-4.4	-0.9	2.5	3.4	2.2	-1.5	-9.0	2.6	-2.1	14.8
管径 m	0.1	2.5	1.4	-0.5	-7.7	0.9	-5.9	0.6	0.8	-0.7	4.6	-1.1	5.4
	0.2	-1.3	0.5	-6.5	-2.5	-7.0	-6.4	-0.4	2.1	-10	-2.2	-5.4	8.7
	1.0	4.6	2.1	-2.1	-7.8	-2.1	0.9	-0.7	1.8	1.4	-3.3	0.9	3.9

因此,在用等面积圆环法进行颗粒物质量浓度测量时,弯头上游的断面可以采用增加等面积圆环的方法增加测量的准确性,弯头下游的测量断面最好选择在距离弯头出口 $4D$ 断面处,将等面积圆环增加2倍可以得到更精确的测量结果.当弯头下游距离不足 $1D$ 时,利用等面积圆环法在弯头出口断面进行测量也可以得到可接受的结果,误差最大不超过8.9%.

为了寻找单点颗粒物质量浓度与断面平均质量浓度之间的关系,本文在断面径向上均匀取10个测点,将单点质量浓度与断面平均质量浓度进行对比,发现对于同一颗粒物,单点质量浓度与平均质量浓度之间存在线性关系,但是由此线性关系校正得到的实际质量浓度误差较大,对于实际测量指导性欠佳,尚需探索其他简化的检测方法.

4 结 论

1) 90° 弯管内气流分布仅受曲率直径比的影响,风速大小和颗粒物参数对弯管内气流分布无影响;弯管内颗粒物分布受曲率直径比和颗粒物粒径的影响.

2) 在弯头出入口断面处,等面积圆环法测得的断面平均风速与实际风速之间的误差受管径和曲率直径比的影响,曲率直径比一定时,管径和误差之间存在函数关系,可以通过拟合曲线校正测量结果,当曲率直径比大于3.0时,等面积圆环法测量产生的误差可忽略,在弯头出口截面处,曲率直径比等于1.0时的误差可忽略,曲率直径比为1.5时可以直接将测量误差视作6%.弯管管道中心风速和断面平均风速之间存在线性关

系,管道中心点风速乘以相应的校正系数就可以得到断面的平均风速.

3) 等面积圆环法测量断面平均颗粒物质量浓度时,在弯头出入口处,误差均在10%以下;在理想测量断面进行测量不会降低测量误差,可以采用对等面积圆环加密的方式降低弯头上游、距离弯头出口 $2D$ 和 $4D$ 断面的测量误差.

参考文献:

- [1] 国家卫生健康委发布2021年全国职业病报告[J]. 职业卫生与应急救援, 2022, 40(4): 416.
(National Health Commission released 2021 national occupational disease report [J]. *Journal of Occupational Health and Emergency Rescue*, 2022, 40(4): 416.)
- [2] Oberdoester G, Oberdoester E, Oberdoester J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2005, 113(7): 823-839.
- [3] 刘殿武. 用速度场系数简化风速测量方法[J]. 煤矿安全, 2005(5): 42-43.
(Liu Dian-wu. Simplifying wind speed measurement method with velocity field coefficient [J]. *Safety in Coal Mines*, 2005(5): 42-43.)
- [4] Gladyszewska-Fiedoruk K, Demianiuk A B, Gajewski A, et al. Measurement of velocity distribution for air flow through perforated plastic foil ducts [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(2/3): 374-378.
- [5] Ostrowski P, Remiorz L. Measurement of gas flow in short ducts, also rectangular [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, 30: 1-9.
- [6] Care I, Bonthoux F, Fontaine J R. Measurement of air flow in duct by velocity measurements [C]// Proceedings of the 16th International Congress of Metrology. Paris: EDP Sciences, 2013: 00010.
- [7] Chow J C, Watson J G, Wang X, et al. Review of filters for air sampling and chemical analysis in mining workplaces [J]. *Minerals*, 2022, 12(10): 1314.
- [8] Pampeña J D, Cauda E G, Chubb L G, et al. Use of the field-based silica monitoring technique in a coal mine: a case study [J]. *Mining Metallurgy & Exploration*, 2020, 37(2): 717-726.
- [9] Molaie S, Lino P. Review of the newly developed, mobile optical sensors for real-time measurement of the atmospheric

- particulate matter concentration [J]. *Micromachines*, 2021, 12(4):416.
- [10] Molaie S, Lino P. Theoretical design of the scattering based sensor for analysis of the vehicle tailpipe emission [J]. *Micromachines*, 2020, 11(12):1085.
- [11] Bezantakos S, Costi M, Baempoinis K, et al. Qualification of the Alpha sense optical particle counter for inline air quality monitoring [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2020, 55(3): 361-370.
- [12] 梁艳, 张增福, 陈文亮, 等. 基于 β 射线法的新型 $PM_{2.5}$ 自动监测系统研究 [J]. *传感技术学报*, 2014, 27(10): 1418-1422.
(Liang Yan, Zhang Zeng-fu, Chen Wen-liang, et al. Research of new type $PM_{2.5}$ automated monitoring system based on β -ray method [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014, 27(10): 1418-1422.)
- [13] Chen J G, Li D W, Liu G Q, et al. Development of a coal dust concentration sensor based on the electrostatic induction method [J]. *ACS Omega*, 2023, 8(14): 13059-13067.
- [14] Ribalko A N, Charty P V, Shemanin V G. Dust concentration measurement laser instrument at industrial conditions [C]// Proceedings of the International Conference on Lasers for Measurements and Information Transfer. St Petersburg: SPIE, 2000: 130-136.
- [15] Abou Khoussa M A, Aldurra A, Alwahedi K, et al. Hermetically sealed microwave probe for in-situ detection of black powder in gas pipelines [C]// Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Montevideo, 2014: 1115-1119.
- [16] 李立, 姬忠礼, 许乔奇, 等. 新型高压天然气管道内固体颗粒物在线检测装置及其应用 [J]. *天然气工业*, 2012, 32(12): 81-84.
(Li Li, Ji Zhong-li, Xu Qiao-qi, et al. On-line detection device for solid particulate matter in novel high-pressure natural gas pipeline and its application [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(12): 81-84.)
- [17] Sudo K, Sumida M, Hibara H. Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend [J]. *Experiments in Fluids*, 1998, 25(1): 42-49.
- [18] Kim J, Yadav M, Kim S. Characteristics of secondary flow induced by 90 degree elbow in turbulent pipe flow [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2014, 8(2): 229-239.
- [19] 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.
(Xiong Pan, Yan Shu-guang. Numerical simulation of particle size distribution of cyclone dust collector based on Rosin-Rammler function [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2019, 29(2): 29-32.)