

圆形截面双扭管内流动稳定性和均匀性评估

杨国英^{1,2}, 邓清华^{1,2}, 何伟^{1,2}, 丰镇平^{1,2}

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安;
2. 西安交通大学陕西省叶轮机械及动力装备工程实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对圆形截面双扭管的工业输水管道中存在流动稳定性和均匀性较差的问题, 基于能量梯度理论, 采用数值方法, 着重研究了雷诺数在 $6 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$ 范围时, 0° 、 90° 和 180° 3 种角度双扭管布置方式对圆形截面双扭管内部流动稳定性和均匀性的影响规律。结果表明: 相同雷诺数条件下, 下游直管段 $12D$ 范围内, 180° 双扭管的速度均匀性最好, 0° 双扭管次之, 90° 双扭管最差, 压力均匀性的变化则刚好相反; 90° 双扭管在下游弯管处, 流体所受合力在周向和径向存在较大分量, 导致次流较强, 其旋涡角在 3 种双扭管中最大; 在本文计算的下游 $45D$ 处, 90° 双扭管的旋涡角仍在 10° 左右, 因而要达到流量计安装要求, 还需要更长的直管段; 在雷诺数 $6 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$ 范围内, 随着雷诺数增大, 双扭管内部流动稳定性降低, 压力均匀性降低, 但是相对应的速度均匀性提升。

关键词: 双扭管; 稳定性; 均匀性; 旋涡角

中图分类号: TK313 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202106013 **文章编号:** 0253-987X(2021)06-0102-11



OSID 码

Evaluation of Flow Stability and Uniformity in Double Elbow Pipe with Circular Cross Section

YANG Guoying^{1,2}, DENG Qinghua^{1,2}, HE Wei^{1,2}, FENG Zhenping^{1,2}

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Engineering Laboratory of Turbomachinery and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For the poor flow stability and uniformity problem of double elbow pipes with circular cross section in industrial water pipeline, based on the energy gradient theory, a numerical simulation method is used to study the influencing rules of three different arrangement modes of the double elbow pipe at angles 0° , 90° and 180° on the flow stability and uniformity when Reynolds number ranges from 6×10^5 to 1.2×10^6 . The results show that under the same Reynolds number condition, the velocity uniformity of 180° double elbow pipe is the best among the three arrangement schemes within $12D$ downstream length, followed by 0° double elbow pipe, and 90° double elbow pipe is the worst, while the results of the pressure uniformity are just the opposite. The resultant force at the downstream bend of 90° double elbow pipe has larger components in circumferential and radial directions, resulting in strong secondary flow, while its swirling angle is the largest among the three arrangements. At the downstream $45D$ location of double elbow pipe with 90° , the swirling angle is about 10° , so a longer straight distance is needed to meet the requirements of flowmeter installation. When the Reynolds number is in the range of 6×10^5 to 1.2×10^6 , the stability of flow and the pressure uniformity decrease with the

increase of Reynolds number, but the corresponding velocity uniformity increases.

Keywords: double elbow pipe; stability; uniformity; swirling angle

工业管路中液体流动不稳定会给管路带来振动,给设备运行带来安全隐患,此外流动不均匀也会造成流量测量不准确。Mattingly 等认为,90°单弯头会产生旋涡流,使下游流动稳定性和均匀性降低,导致孔板流量计的测量值低于实际值^[1]。苏宝焕等研究了上游弯管的设置对超声波流量计测量工业锅炉给水流量准确性的影响,发现弯管下游管道内的速度呈非理想分布状态,对水流量测量的准确性影响较大,流量理论值均比实际值小^[2]。

在工业输水管道中,受运行环境、技术手段以及流量测量等特殊目的的限制,管路中常含有弯管、孔板、阀门等部件,这些会使管内流体的流动稳定性和均匀性下降^[3]。管路中流量的准确测量至关重要。流量计对于流动稳定性和均匀性的要求较高,根据 GB/T 2624.1—2006 圆形截面管道流量计安装标准,安装位置处的流动状态必须是整个管道截面的旋涡角均小于 2°的充分发展管流。液体流过弯管、双扭管、孔板、阀门等特殊部件后,需要在下游加设 20~50 倍直径的直管道来降低不稳定、不均匀的流动状态。实际生产中,受到环境、成本等因素的影响,多数情况不满足流量计的要求。在这些部件下游安装流动调整器可以消除不稳定的流动,使流动在较短的直管段条件下形成稳定无旋涡的充分发展的流动状态^[4]。因此,研究这些部件产生的畸变流场以及其对流动稳定性和均匀性的影响,可为流量计和流动调整器的安装提供依据。

双扭管是一种典型的管道部件,其由两个 90°弯管组合而成,也被称为双弯头结构。液体在双扭管内部受弯管曲率、流动雷诺数、黏滞力、离心力等多重因素的影响,流动状态非常复杂,其下游流体的流动与充分发展的紊流流动状态相差甚远^[5]。李涛等利用试验和数值模拟手段,对 90°弯管 Z 型组合进行了研究,分析了管道中压力和速度分布,且对相邻影响系数随弯管间距离变化规律进行总结,为矩形 90°弯管 Z 型组合的相邻影响规律的研究和预测提供了依据^[6]。Laribi 等研究了平面双弯头和不同平面双弯头条件下旋流对标准孔板流量计测量精度的影响,结果表明旋流会导致 2%~4% 的误差^[7]。李彦梅等研究了上游双弯头对于内锥流量计的影响,发现上游双弯头会增加内锥流量计的不确定度^[8]。赵丹利用数值模拟方法研究了双弯头下游超

声流量计的特性,发现双弯头所造成的测量误差可达 2.4%^[9]。刘琦等利用数值仿真方法,研究了双扭管下游不同位置处采用 DANIEL 3400 超声流量计计量的准确性,结果表明,计量管内径越大,流态稳定时超声流量计的相对误差就越小,与竖直方向上同平面内布置的双 90°弯头相比,异面双 90°弯头下游直管内超声流量计的相对误差波动较弱,但在流速恢复过程中,计量误差较大^[10]。王瑞欣等认为竖直双弯头(90°布置)产生的管内流态畸变对压差式流量计的测量精度有较大影响^[11]。

双扭管管道内部流动状态比较复杂,如果不加装流动调整器,其下游需要较长的直管段来消除不均匀、不稳定的流动。Laws 研究不同平面双弯头形成的旋流,认为对由不同平面 90°双弯头形成的旋流,要达到节流装置流量测量标准(ISO 5167)提出的小于 2°的旋涡角的要求,需要 100 倍管径的直管段长度^[12]。屈鑫鑫认为,非平面双弯头管道内存在较大的涡流,有较大的速度偏差,且在下游较长距离内该速度偏差会继续存在^[13]。王慧锋等对于 A+K 平衡流量计与上游同平面 90°双弯头时之间所需最短直管段长度进行了实验研究,发现所需最短直管段长度为 40D^[14]。陈利琼等采用数值模拟方法研究了 180°弯头对 DANIEL 3400 型超声流量计测量特性的影响,发现为了保证流量计的测量准确性,180°弯头与流量计之间所需要的直管段长度至少为 50D^[15]。根据国家标准 GB/T 2624.1—2006,几种典型的流量计安装标准均对双扭管下游直管段的长度提出要求,所需直管段均较长,如表 1 所示。

表 1 典型流量计上游与双扭管之间所需直管段长度
Table 1 Length of straight pipe between typical flowmeter upstream and double elbow pipe

流量计种类	直管段长度	
	同一平面	不同平面
	两个 90°弯头 的双扭管	两个 90°弯头 的双扭管
孔板流量计	22D	34D
喷嘴和文丘里喷嘴流量计	25D	40D

总的来说,国内外对于双扭管的研究相对较少,当前研究的雷诺数均低于 6×10^5 ,缺乏适合于核电站部分输水管道的高雷诺数的研究,且国内外的研

究缺乏对于双扭管下游直管段流动稳定性和均匀性的研究。本文根据能量梯度理论,利用数值模拟着重分析了在不同的雷诺数条件下,0°、90°和 180° 3 种双扭管布置方式对其内部流动稳定性和均匀性的影响规律,并与流量计安装标准进行对比,以验证在其下游直管段相应位置是否满足安装要求,为流量计以及流动调整器的合理利用提供依据。

1 数理模型

1.1 几何模型

双扭管模型如图 1 所示,由两个相同的 90°弯管组合成 0°、90°以及 180°。表 2 列出了 3 种模型的几何参数。本文依据 CAP1400 核电机组的管路选用了常见的 DN150 管道,入口边界条件为均匀来流,至充分发展紊流所需距离小于 5*D*,因此入口直管段设为 5*D*。根据表 1,典型流量计上游与双扭管之间所需直管段长度最长为 40*D*。为方便对比,下游直管段长度设为 50*D*,其余尺寸根据 ASME B36.10 标准给出。

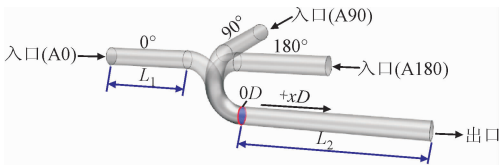


图 1 双扭管模型图
Fig. 1 Model of double elbow pipe

表 2 双扭管几何参数

Table 2 Geometric parameters of double elbow pipe

参数	数值
圆管直径 <i>D</i> /mm	154.08
上游段长度 <i>L</i> ₁ /mm	770.4
弯头半径 <i>R</i> /mm	231.12
下游段长度 <i>L</i> ₂ /mm	7 704

1.2 边界条件

基于 CAP1400 核电机组的管路流动参数,工质为水,表 3 列出了计算时的详细边界条件。管道壁面设置为绝热,管道进口的流量设置与 $6\times10^5\sim1.2\times10^6$ 的雷诺数相匹配。

1.3 网格无关性验证

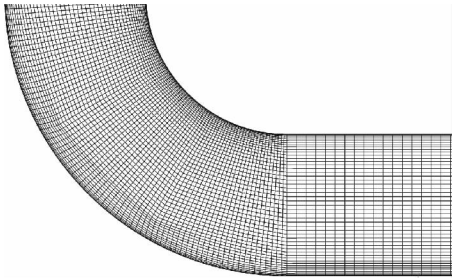
计算域剖分采用结构化网格,其截面和流向上的局部网格如图 2 所示。本节采用 5 组尺度的网格进行独立性验证。对于文中所有网格,边界层网格第一层厚度为 0.001 mm,增长率设置为 1.2,边界

层数为 10~15 层。总体网格数量从 100 万至 800 万,全局网格尺寸后者分别约是前者的 0.8、0.7、0.6 和 0.5 倍。

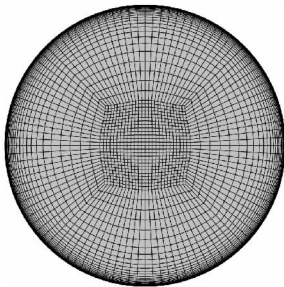
表 3 边界条件参数

Table 3 Parameters of boundary condition

参数	数值
进口质量流量/(kg·s ⁻¹)	39.940
	49.920
	59.905
	69.890
	79.776
进口温度/K	323.15
进口湍流强度/%	5
出口静压/MPa	0.18



(a) 流向网格



(b) 横截面网格

图 2 计算域网格

Fig. 2 Grid of computational domain

图 3 展示了网格无关性验证的结果,管道内部流动状态与速度、压力等参数息息相关,本节比较了不同网格尺度下管道中心线-10*D*~10*D* 范围内(以下游弯头出口截面为 0*D* 截面,管道各横截面中心与 0*D* 截面中心之间的中心线长度记为 *L*,见图 1)的速度。从图中可以看出,当网格数量达到 300 万以上时,各曲线速度差别很小,400 万、500 万和 800 万网格的曲线几乎重合。因此本文在计算时采用 500 万网格,保证了计算结果的网格独立性。

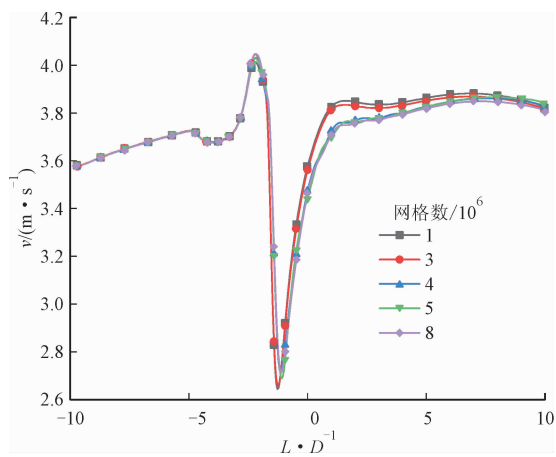


图 3 网格数量对管道中心线速度的影响

Fig. 3 Influence of grid number on velocity at pipeline centerline

1.4 湍流模型验证

管道布置方案对流动损失、稳定性和均匀性影响较大,本节参考文献[16]中的实验数据,建立了计算模型,如图 1 中的 0°双扭管,其中 $L_1=50D$, $L_2=100D$,其余尺寸与表 2 相同。

根据参考文献[16],双扭管可以认为是两个 90°弯管的组合,每个弯管都可认为是特殊的管件。若雷诺数远大于 5×10^5 ,可认为相邻影响系数 C 与雷诺数 Re 无关,且此模型的 L_s/D (两管件之间的相对间距)为 0, R/D (弯头半径与圆管直径之比)为 1.5。 C 的计算公式为

$$C=\frac{\xi'}{\xi_1+\xi_2}\tag{1}$$

式中: ξ' 为将双扭管按照单个管件计算所获得的局部阻力系数; ξ_1 和 ξ_2 分别为上、下游弯管的局部损失系数。根据参考文献[17],弯管的局部阻力损失系数

$$\xi=\frac{\Delta h_{\xi}}{(V^2/2g)}\tag{2}$$

式中: Δh_{ξ} 为压头降; g 为重力加速度; V 为截面平均流速。

采用 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型和 SST $k-\omega$ 模型计算了雷诺数为 7×10^5 、 1×10^6 以及 1.2×10^6 的结果,并与参考文献[16]的相邻影响系数 C 的结果进行对比,如图 4 所示。可以看出,相对于实验结果,4 种湍流模型的计算结果均偏低,尽管如此,SST $k-\omega$ 湍流模型的结果与实验结果最接近。

另外,本文基于参考文献[18]的实验数据,对湍流模型的可靠性进行了进一步验证。文献[18]中的双扭管结构与本文图 1 的 0°双扭管模型相似,圆管

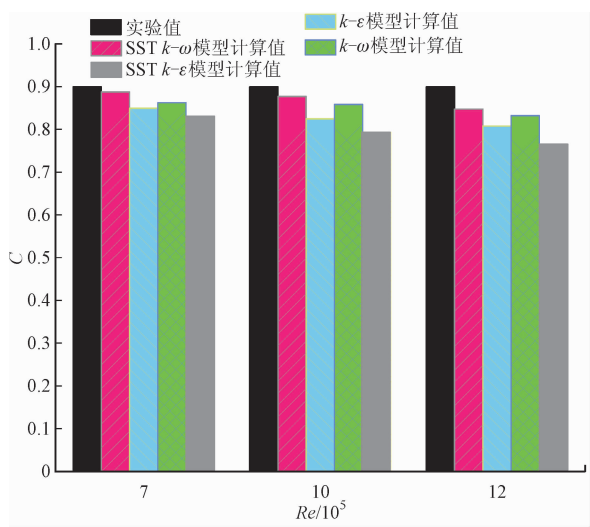


图 4 数值结果与实验数据比较

Fig. 4 Comparison of numerical results and experimental data

直径 D 为 192 mm,弯头半径 R 为 192 mm,进出口直管段均为 $50D$ 。选取下游弯管 60°截面处的轴向速度实验数据进行验证,其中, r_i 为截面上某点到管道中心轴线的距离, r 为管道半径, V_i 为截面上某点处的轴向速度, V_z 为该截面上的轴向平均速度。湍流模型验证结果如图 5 所示,可以看出 $k-\omega$ 湍流模型和 SST $k-\omega$ 湍流模型都能够预测该截面上轴向速度的变化趋势,但是 SST $k-\omega$ 湍流模型与实验值之间差别最小,因此,本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行计算。

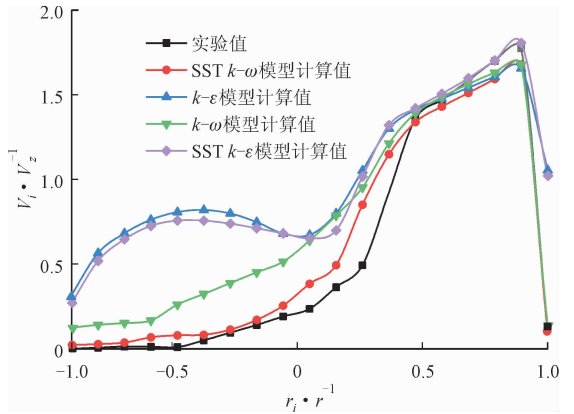


图 5 下游弯管 60°截面轴向速度分布

Fig. 5 Axial velocity distribution of downstream elbow on 60° section

2 分析及评价方法

本文流动稳定性分析方法主要是依据窦华书等提出的能量梯度理论^[19-21],采用能量梯度函数 K 表

征流动稳定性的大小。同时,借助 Q 准则^[22]进行涡量分析。其他表征流动状态的参数如下。

2.1 旋涡角

根据 GB/T 2624.1—2006,流量计安装处的流动必须是近似无旋涡的充分发展紊流,旋涡角应低于 2° 。根据 GB/T 17611—1998,旋涡角 θ 为横截面某给定点的局部速度与管道轴线之间的夹角,其计算公式为

$$\theta = \arccos \frac{|V_w|}{|V|} \quad (3)$$

式中: V_w 代表给定点速度在管道轴线方向上的分量; V 代表给定点的速度。

2.2 均匀性指标

速度和压力均匀性能全面反映整个通流截面的流动状态。根据 Weltens 等提出的均匀性评价指标^[23],均匀性指数 γ 的表达式为

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n \frac{\sqrt{(\varphi_j - \bar{\varphi})^2}}{\bar{\varphi}} \quad (4)$$

式中: γ 取 $[0, 1]$, γ 越大表示流动均匀性越好; j 为监测点序号; n 为监测点总数; φ_j 为监测点的速度或者压力; $\bar{\varphi}$ 为测量截面上的平均速度或平均压力。

3 结果与讨论

本文的数值模拟在 5 种雷诺数条件下进行,分别为 6×10^5 、 7.5×10^5 、 9×10^5 、 1.05×10^6 和 1.2×10^6 。根据 CAP1400 核电机组的实际布置情况,泵入口处的直管段最长仅有 $5D$ 左右,而根据 GB/T 2624.1—2006,流量计与管件之间若安装流动调整器,直管段长度可缩短至 $10D$ 以下,且部分参数 $10D$ 以后变化不大,因此本文对于部分参数只展示 $10D$ 之内的结果。

为方便分析,文中以下游弯头出口截面为 $0D$ 截面(见图 1),管道各横截面中心与 $0D$ 截面中心之间的中心线长度记为 L ,以 L/D 作为各曲线图横坐标。

3.1 不同管道布置方案的流动特性

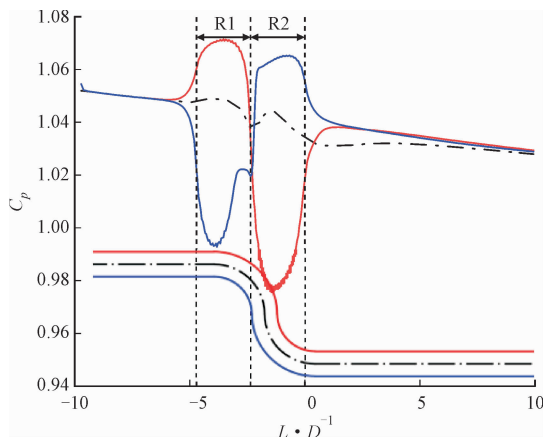
3.1.1 压力和速度参数分析 前已述及,流量计安装位置处的流动状态是旋涡角小于 2° 的充分发展紊流。本节以 $Re = 1.2 \times 10^6$ 为例,详细分析双扭管管道布置方案对管内流动稳定性和均匀性的影响。为便于表示,夹角为 0° 、 90° 和 180° 的 3 种双扭管分别记为 A0、A90 以及 A180。

用无量纲系数 C_p 表示管内的压力,公式为

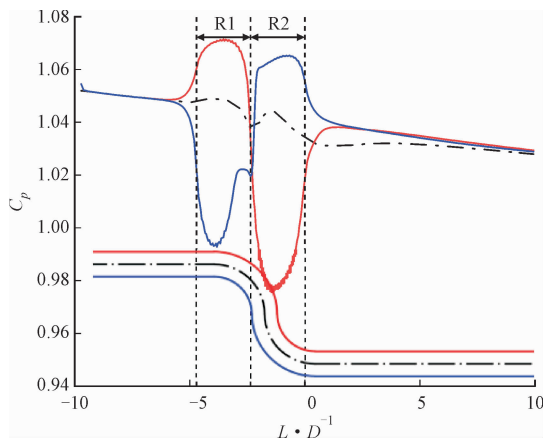
$$C_p = p/p_b \quad (5)$$

式中: p_b 为背压; p 为当地静压。

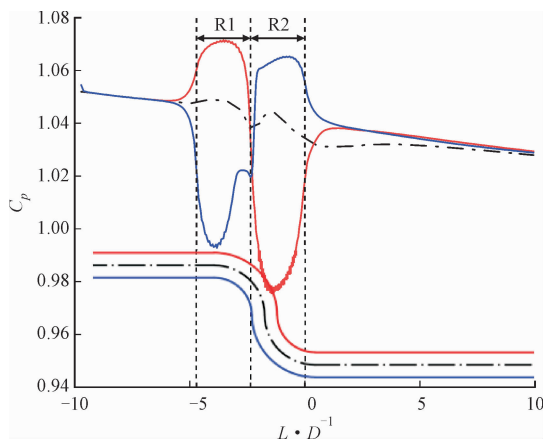
双扭管内部中心线以及上下壁面的压力变化情况如图 6 所示,R1 和 R2 分别代表上游弯管段和下游弯管段。需要说明的是,A90 上下游管道不在同一平面内,因而图例中将管道分为上下游两部分。



(a) A0



(b) A90



(c) A180

图 6 双扭管上下壁面以及中线压力分布图

Fig. 6 Pressure distributions on upper and lower walls and center line of double elbow pipe

从图 6 可以看出,3 种管道布置在转弯处的内部压力分布比较类似,因流体在弯管内会受到离心力,内壁面压力低,外壁面压力高,在弯管流向中部附近,压力达到极值。通过比较发现,在 A90 管道弯曲段下游比较长的距离内,管道中线上的压力与管壁压力差异较大,A0 管道次之,A180 管道内的压力差最小,弯管对流动稳定性的影响距离也最短。

双扭管中截面速度分布如图 7 所示,A90 管道左侧为上游管道,右侧为下游管道。从图中可以看出,与压力分布相反,内壁面速度比较大,外壁面速度比较小,而且均在弯管流向中部附近达到极值。3 种管道流线开始发生剧烈变化的地方都在下游弯管处,说明二次流与涡多产生在下游,也说明下游受结构影响较大,流动状态变得更加复杂。

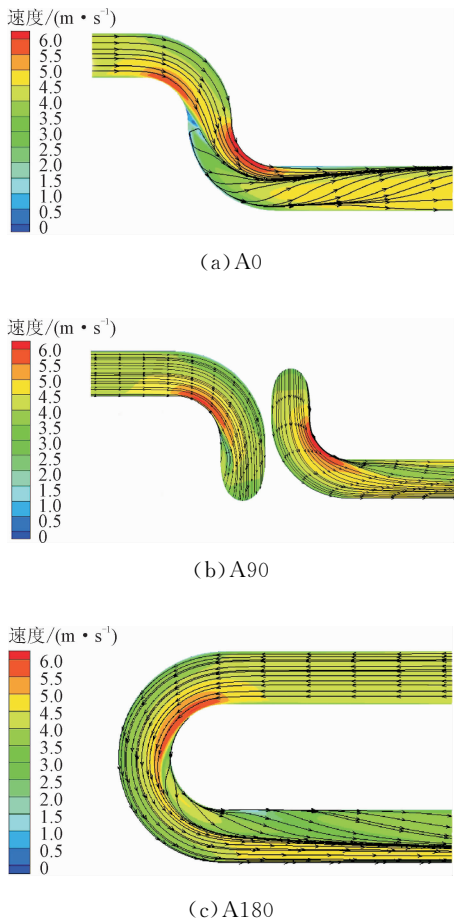


图 7 双扭管中截面速度分布图

Fig. 7 Velocity distribution on middle section of double elbow pipe

3.1.2 流动稳定性分析 根据能量梯度理论,能量梯度函数 K 值越大,流动越不稳定。流动不稳定时容易产生旋涡和回流使管路产生振动,是流体流动在时间和空间层面的反映。图 8 展示了双扭管内部

不同截面处 K 的最大值,因 $10D$ 之后 K 值为 0,为了便于观察,图中仅展示了 $10D$ 之内的变化。弯管内流体受到离心力的影响,与直管段相比流动更不稳定,最不稳定处出现在弯管段流向中部附近。上游弯管处,A180 管道的 K 值最大,流动最不稳定,A90 管道次之,A0 管道最稳定。A90 管道在下游弯管处的压力方向与上游弯管垂直,导致上下游弯管影响相互叠加, K 值最大,流动最不稳定。A180 管道下游弯管内部截面存在较大的 K 值,说明上下游叠加的效应较强,因此 A180 较 A0 管道流动更不稳定。3 种管道的下游直管段 K 值相对较小,且变化不大,流动较为稳定,与前述压力分布相比,流动逐渐趋向于充分紊流发展。从稳定性角度分析,弯管段流动稳定性与直管段流动稳定性相比较差,流动调整器可安装在弯管内部弯头中心外壁面处。

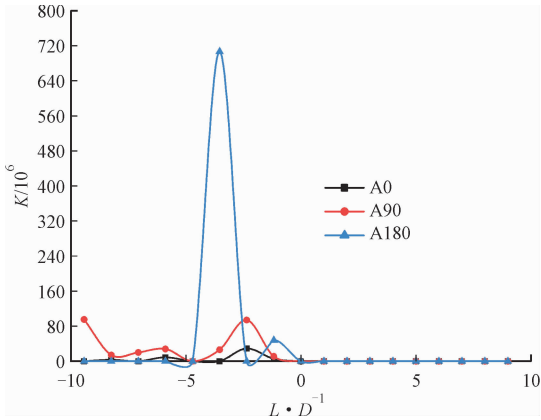
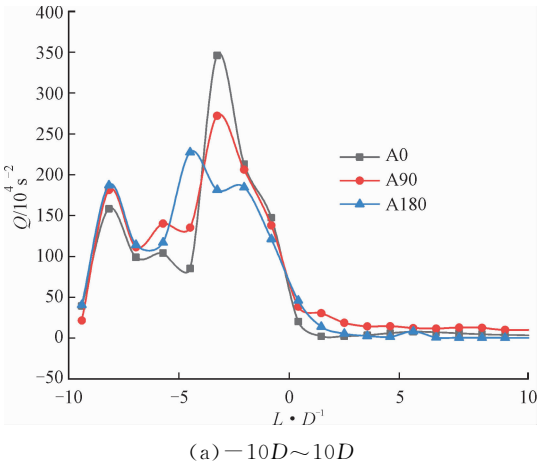


图 8 双扭管不同截面最大 K 值

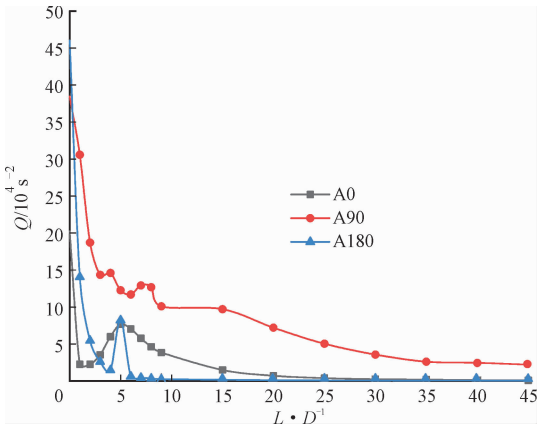
Fig. 8 Maximum K on different sections of double elbow pipe

3.1.3 涡量变化分析 根据涡量 Q 准则, $Q>0$ 才被认为是旋涡。根据 GB/T 2624.1—2006,流量计安装处的流动必须是近似无旋涡的充分发展紊流。图 9 展示了双扭管内部不同截面处 Q 的最大值。 Q 的变化可以直观反映出涡量大小的变化。可以看出,管段内涡量均较大,对比发现,上游弯管段 A180 管道涡量最大,A0 管道涡量最小,下游弯管段 A0 管道涡量最大,A180 管道涡量最小。下游直管段涡量的衰减程度也不一样,A90 管道衰减最慢,到 $45D$ 之后涡量依旧远大于 0。A180 管道衰减最快, $10D$ 左右涡量已经基本为 0,A0 管道则需要到 $25D$ 左右,这说明随着 K 值增大,最大 Q 值也会有一定程度的降低,但是对比 3 种结构发现, K 值并不能决定 Q 值的大小。

为进一步与流量计安装标准进行对比,下游直管段各截面旋涡角的变化如图 10 所示。可以看出,



(a) $-10D \sim 10D$



(b) $0D \sim 45D$

图 9 双扭管不同截面 Q 的最大值

Fig. 9 Maximum Q on different sections of double elbow pipe

下游旋涡角均在减小,A90 管道最大且衰减最慢,A180 管道最小,衰减最快。A90 管道旋涡角直至 $45D$ 依旧比较大,为 10° 左右,表明要达到流量计安装标准中的流动状态要求,需要比较长的直管段。这与 Laws 的研究结果^[10]类似:对由不同平面 90° 双弯头形成的旋流,要达到小于 2° 的旋涡角的要求需要很长的直管段,甚至需要超过 100 倍管径的直管段长度。

根据计算结果,旋涡角要降到 2° 以下,A0 管道需要 $40D$ 直管段长度,A180 管道需要 $22.5D$ 直管段长度。对比流量计的安装要求,A180 管道在安装标准所要求的直管段范围内基本能够满足要求,而 A90 和 A0 管道的流动状态则无法满足要求。这也从侧面说明了双扭管内部流动状态比较复杂,流场产生了较大的畸变。

根据前述分析,3 种管道上游弯管内流动状态比较类似,高速中心逐渐向内壁迁移,并受下游弯管段的影响开始产生畸变,如图 11a 所示。下游弯管

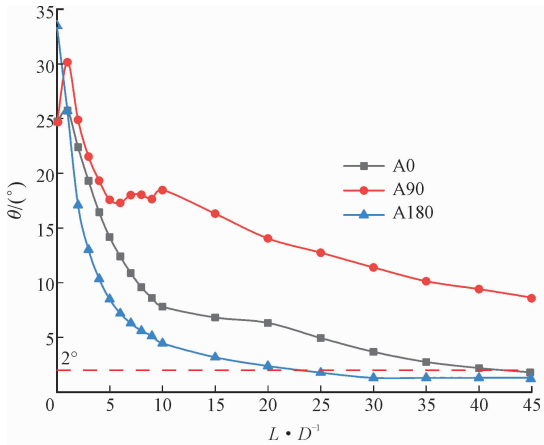
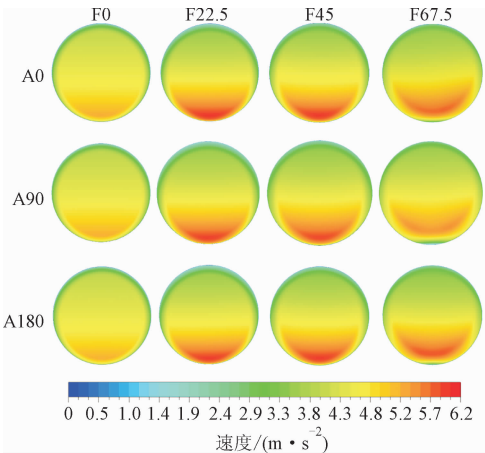
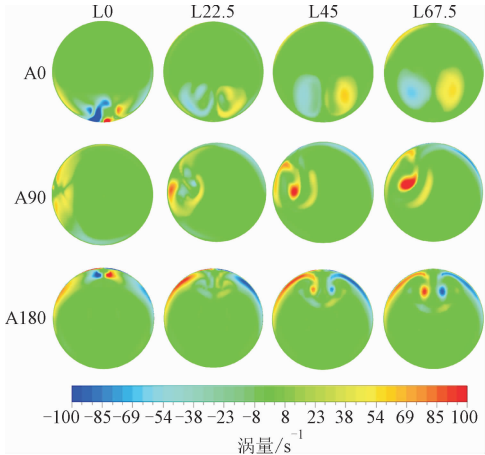


图 10 下游直管段不同截面的旋涡角

Fig. 10 Maximum value of swirling angle of downstream straight pipe on different cross sections



(a) 速度云图



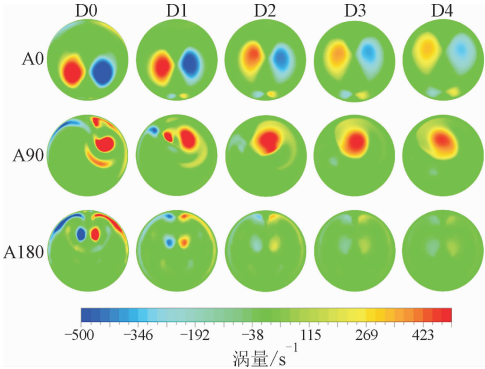
(b) 涡量云图

图 11 弯管段不同截面的速度和涡量云图

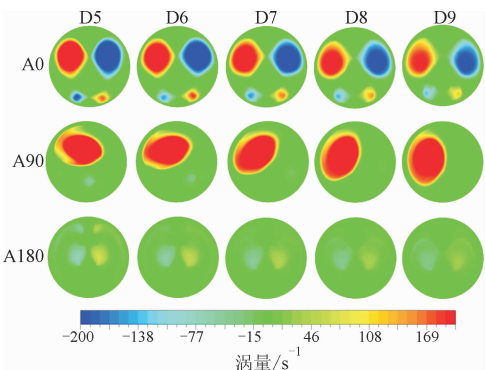
Fig. 11 Cloud chart of velocity and vorticity of elbow on different sections

段差别较大,如图 11b 所示。以 F 表示上游弯管,L 表示下游弯管, F_n 表示上游弯管 n° 处截面, L_n 表示下游弯管 n° 处截面。受到离心力以及压力梯度的影响,涡量中心产生的位置不同,A0 管道产生在外壁面附近,A90 管道产生在左壁面附近,A180 管道产生在内壁面附近。A0 和 A90 管道产生的旋涡影响范围比较大。A0 和 A180 管道结构比较对称,均产生两个对称的涡核,A90 管道产生一个范围较大的涡核,其范围随着流动扩大,位置也在不断变化,并且其影响距离较其他两种管道大。说明 A90 管道在下游弯管处的流动状态最为复杂,这与前文 A90 管道在下游弯管处流动稳定性较差相对应。

图 12 为下游直管段不同截面涡量的变化。 Dm 表示下游直管段中与下游弯头出口截面之间的距离为 m 倍管道直径处的截面。3 种管道下游直管段中涡的影响范围都在慢慢扩大,A90 管道内不仅其范围扩大,而且位置也在变化,说明内部二次流较高。A180 管道中涡的影响范围较小,而且到出口涡量基本为 0。A0 管道低速中心慢慢扩大,但是涡量却变小,旋转速度较小。



(a) D0~D4

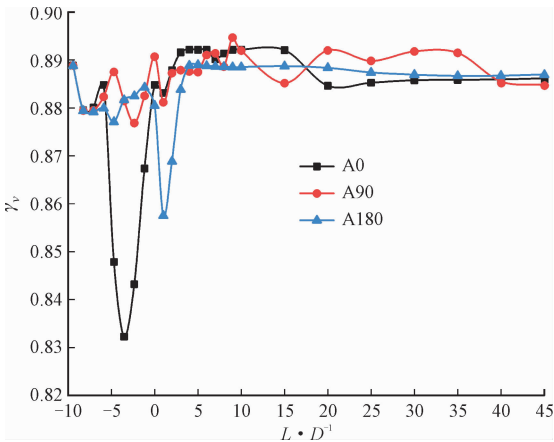


(b) D5~D9

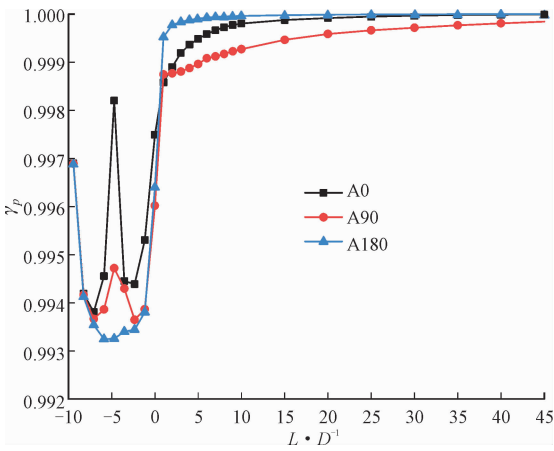
图 12 直管段不同截面涡量云图

Fig. 12 Cloud chart of velocity and vorticity of straight pipe on different sections

3.1.4 速度、压力均匀性分析与流动稳定性不同,流动均匀性是流体流动在空间层面的反映,如速度均匀性能够反映通流截面流体速度的分布特性。在流量计安装标准中,并没有对流动均匀性做出特殊要求,但是充分发展的紊流必然是速度均匀性与压力均匀性比较高的流动,而且根据 CAP1400 核电机组的标准,一些特殊位置(如泵入口等)的速度均匀性和压力均匀性需要达到 90% 以上。图 13 表示双扭管内不同截面的速度均匀性和压力均匀性。上游弯管内,A0 管道的速度均匀性最低,A90 管道次之,A180 管道速度均匀性最高。而在下游弯管,A180 管道的速度均匀性最低,其次是 A0 管道,A90 管道最高,下游直管段 3 种管道的速度均匀性和流动稳定性差别都较小,这与前述的流动稳定性的变化大致是相反的,即流动稳定性增大时,速度均匀性反而会降低。



(a) 速度均匀性



(b) 压力均匀性

图 13 下游直管段不同截面速度和压力分布

Fig. 13 Velocity and pressure distributions of downstream straight pipe on different sections

尽管在前文已经指出,A180 管道在下游直管段涡核影响区域较小,而且影响距离较短,A90 管道中涡核影响范围较大,影响距离也较长。但是根据图 13a,下游直管段 $12D$ 内,A180 速度均匀性最低,A90 均匀性最高,说明涡量并不能决定流动均匀性。通过比较下游直管段内速度和压力均匀性发现,速度均匀性相差不大,均在 89% 上下波动,但是受上游弯管的影响,A0 管道下游直管段速度均匀性短距离内波动较大,A90 管道整体波动都较大,直到 $45D$ 处依旧在波动,A180 管道比较稳定。3 种管道的速度均匀性均低于 90%,说明直管段的距离可能无法满足要求,需要加长直管段。3 种结构压力均匀性相差不大且均较高,超越了 99.3%,与速度均匀性相反,A180 管道压力均匀性最高,A90 管道压力均匀性最低。

3.2 雷诺数对流动稳定性和均匀性的影响规律

不同雷诺数会导致流场结构的变化,必然会对流动稳定性和流动均匀性造成影响。根据模拟结果,A0、A90 和 A180 管道结果比较类似,因此本文以 A0 管道为例,分析雷诺数对于双扭管内部流动状态的影响规律。图 14 给出了不同雷诺数对于 A0 管道内部不同截面能量梯度函数 K 的影响。雷诺数越大,平均 K 值越大,流动越不稳定,说明双扭管内部的高雷诺数流动非常不稳定。同时,雷诺数越大,平均 Q 值越大,但是雷诺数对于 Q 的影响并不大,如图 15 所示。

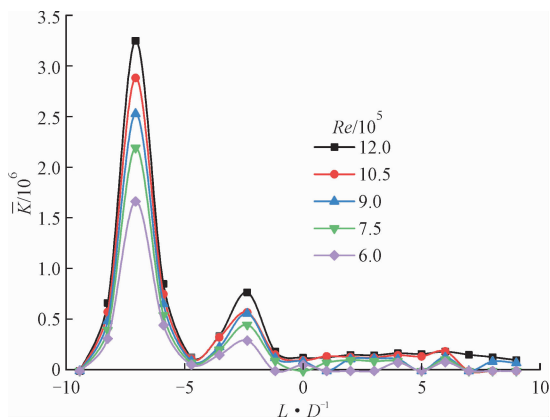


图 14 A0 管道不同截面平均 K 值变化

Fig. 14 Variation of average K value of A0 pipeline on different sections

图 16 展示了 A0 管道不同截面旋涡角随雷诺数变化。通过对比发现,不同雷诺数所对应的曲线几乎重合,说明对于布置方式确定的双扭管,不同雷诺数对于下游直管段旋涡角的影响比较小。与前述

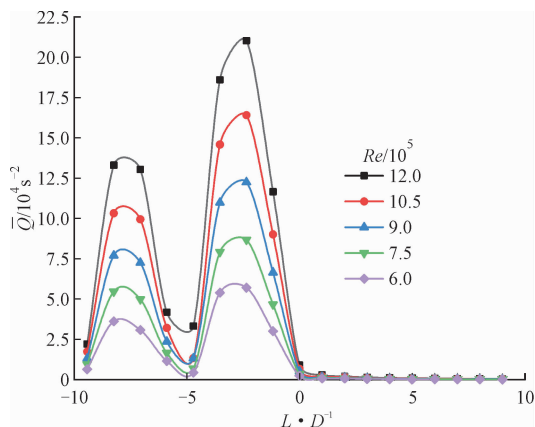


图 15 A0 管道不同截面平均 Q 值变化

Fig. 15 Variation of average Q value of A0 pipeline on different sections

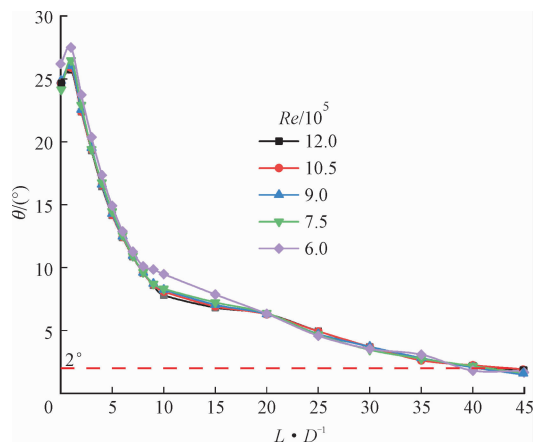


图 16 A0 管道不同截面旋涡角变化

Fig. 16 Variation of swirling angle of A0 pipeline on different sections

结果对比,说明双扭管内旋涡角的变化主要受双扭管布置方式的影响。

图 17 展示了 A0 管道不同截面速度均匀性和压力均匀性随雷诺数的变化。根据图 17,随着雷诺数的增大,相同截面的速度均匀度增高,这与流动稳定性的变化是相反的,说明流动稳定性增大时,速度均匀性反而会降低。但是随着雷诺数增大,压力均匀性会略微降低。说明雷诺数对于速度均匀性和压力均匀性的影响效应是相反的。同时,所有雷诺数的压力均匀度均比较高,可达 99% 以上。说明并非雷诺数越大,流动均匀性越差。从图中还可以看出,无论是速度均匀性还是压力均匀性,不同雷诺数下的变化趋势大致上是相同的,说明雷诺数对于速度均匀性和压力均匀性的位置变化影响比较小。

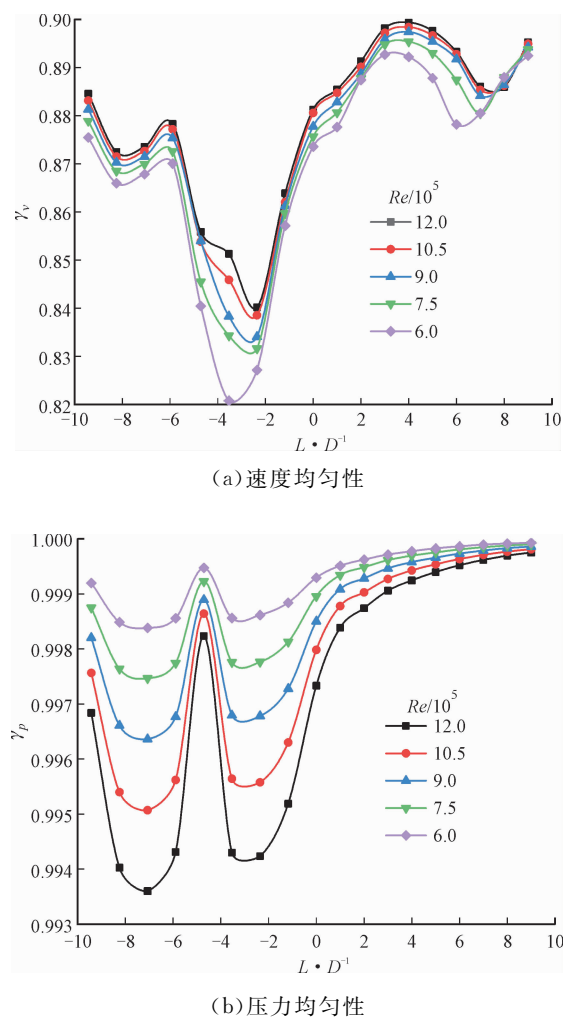


图 17 A0 管道不同截面速度均匀性和压力均匀性

Fig. 17 Velocity and pressure uniformity of A0 pipeline on different sections

4 结 论

(1)在双扭管的 3 种布置方式中,下游直管段流动稳定性均较好。下游直管段 12D 内,A180 管道速度均匀性最好,A0 的次之,A90 的最差,压力均匀性正好相反。A90 管道下游弯管处所受合力在周向和径向有较大的分量,导致次流较强,旋涡角最大,其旋涡角衰减速度也最慢。A180 管道流场最好,A0 管道介于 A90 和 A180 布置方式之间。

(2)若不加设流动调整器,与典型流量计的安装要求所需直管段相比,双扭管要达到要求的流动状态,即旋涡角小于 2°的充分发展紊流所需的直管段更长,A0 管道需要 40D,A180 管道需要 22.5D,A90 管道则在本文计算的 45D 处旋涡角为 10°左右,距离 2°相差较大,说明需要更长的直管段才能满足流量计安装要求。

(3)在雷诺数为 $6 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$ 范围内,随着雷诺数增大,双扭管内部流动稳定性降低,但是相对应的速度均匀性提升,压力均匀性降低;雷诺数变化对于下游直管段旋涡角的影响较小。

(4)若不加设流动调整器,双扭管内速度均匀性较差,至 45D 处速度均匀性仍处于 90% 以下。压力均匀性受影响较小,1D 内可提升至 99.7% 以上。因此双扭管管道内部若要安装流动调整器,应重点提升其速度均匀性。

参考文献:

[1] MATTINGLY G E, YE H T T. Summary report of NIST's industry-government consortium research program on flowmeter installation effects with emphasis on the research period [R/OL]. (1994-09-01)[2020-10-01]. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/TN/nbstechnica/note1408.pdf>.

[2] 苏宝焕, 吕薇, 齐国利, 等. 上游弯管对工业锅炉水流量测量准确性的影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(6): 18-23.

SU Baohuan, LÜ Wei, QI Guoli, et al. Influence of upstream pip bends on the water flow measurement accuracy of industrial boiler [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018, 23(6): 18-23.

[3] 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.

[4] ERDAL A. A numerical investigation of different parameters that affect the performance of a flow conditioner [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 1998, 8(2): 93-102.

[5] 张巧玲, 曹佳豪, 杨振东, 等. 基于 Zanker 型流动调整器的平面双弯头流场特性研究 [J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(3): 78-83.

ZHANG Qiaoling, CAO Jiahao, YANG Zhendong, et al. Study of flow field characteristics of plane double elbow based on Zanker perforated flow regulator [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34 (3): 78-83.

[6] 李涛, 李安桂. 通风管道 90°弯管 Z 型组合局部阻力相邻影响系数的实验与数值模拟 [J]. 流体机械, 2006, 34(8): 9-14.

LI Tao, LI Angui. Numerical and experimental study of ratio of net closed coupled uncoupled of 90° ells in Z-shape [J]. Fluid Machinery, 2006, 34(8): 9-14.

- [7] LARIBI B, WAUTERS P, AICHOUNI M. Experimental study of aerodynamic behavior downstream of three flow conditioners [C]//ASME 2002 Joint U. S. -European Fluids Engineering Division Conference. New York, USA: ASME, 2002: 115-119.
- [8] 李彦梅, 徐英, 张立伟, 等. 上游双弯头对内锥流量计性能的影响 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2417-2422.
LI Yanmei, XU Ying, ZHANG Liwei, et al. Effects of upstream double pipe elbows on the performance of cone flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2417-2422.
- [9] 赵丹. 超声流量计探头伸缩位置及流量数值积分方法优化研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012: 1-70.
- [10] 刘琦, 霍思彤, 唐露瑶. DANIEL 超声流量计在双弯头下游流场内的适应性研究 [J]. 油气田地面工程, 2018, 37(6): 59-61.
LIU Qi, HUO Sitong, TANG Luyao. Adaptability study on the DANIEL ultrasonic flowmeter in the double elbow down-stream flow field [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2018, 37(6): 59-61.
- [11] 王瑞欣, 郭亚军, 屈鑫鑫, 等. 基于 PIV 技术流动调整器性能试验研究 [J]. 推进技术, 2019, 40(12): 2708-2714.
WANG Ruixin, GUO Yajun, QU Xinxin, et al. Experimental study on performance of flow conditioners based on PIV measurements technology [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(12): 2708-2714.
- [12] LAWS E M. Flow conditioning: a new development [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 1990, 1(3): 165-170.
- [13] 屈鑫鑫. 带流动调整器圆形截面管道内流场分布特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017: 32-44.
- [14] 王慧锋, 李莉, 吴中相. 同平面双弯头条件下 A+K 流量计前直管段长度的实验研究 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2013, 39(4): 477-481.
WANG Huifeng, LI Li, WU Zhongxiang. Experimental research on straight pipe length of A+K flowmeter when double elbows on the same plane are installed in the upstream [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 39(4): 477-481.
- [15] 陈利琼, 谢虹雅, 孙靖云, 等. 基于 CFD 的气体超声流量计计量准确性研究 [J]. 中国测试, 2019, 45(7): 87-91.
CHEN Liqiong, XIE Hongya, SUN Jingyun, et al. Research on the measurement accuracy of gas ultrasonic flowmeter based on CFD [J]. China Measurement and Testing Technology, 2019, 45(7): 87-91.
- [16] 贺益英, 赵懿珩, 孙淑卿, 等. 输水管道中弯管局部阻力的相邻影响 [J]. 水利学报, 2004, 35(2): 17-20.
HE Yiyong, ZHAO Yijun, SUN Shuqing, et al. Interaction of local loss between bends in pipe line [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 17-20.
- [17] 贺益英, 赵懿珩, 孙淑卿, 等. 弯管局部阻力系数的试验研究 [J]. 水利学报, 2003, 34(11): 54-58.
HE Yiyong, ZHAO Yijun, SUN Shuqing, et al. Experimental study on local loss coefficient of bend in pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(11): 54-58.
- [18] 赵懿珩, 贺益英. 直角 Z 形组合双弯管流动特性的研究 [J]. 水利学报, 2006, 37(7): 778-783.
ZHAO Yijun, HE Yiyong. Experimental study on local loss coefficient of bend in pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 778-783.
- [19] DOU Huashu. Mechanism of flow instability and transition to turbulence [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2006, 41(4): 512-517.
- [20] DOU Huashu. Physics of flow instability and turbulent transition in shear flows [J]. Physics, 2006(6): 1411-1425.
- [21] DOU Huashu, KHOO B C, YEO K S. Instability of Taylor-Couette flow between concentric rotating cylinders [J]. International Journal of Thermal Science, 2008, 47: 1422-1435.
- [22] HUNT J, WRAY A, MOIN P. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows: CTR-S88 [R]. Stanford, California, USA: Proceeding of the Summer Program. Stanford University. Center for Turbulent Research, 1988: 193-208.
- [23] WELTENS H, BRESSLER H, TERRES F, et al. Optimization of catalytic converter gas flow distribution by CFD prediction [J]. SAE Technical Paper, 1993: 930780.

(编辑 亢列梅)