

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.08.008

矩形截面直角弯管内置导流板的优化研究

Optimization research on deflectors installed in right-angle bend tube
with rectangular section

王周君^{1,2}, 黎星华², 唐立军¹, 段泉圣²

WANG Zhoujun^{1,2}, LI Xinghua², TANG Lijun¹, DUAN Quansheng²

(1. 云南电网有限责任公司 电力科学研究院, 昆明 650217; 2. 华北电力大学
控制与计算机工程学院, 北京 102206)

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Company Limited, Kunming 650217, China; 2. School
of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要:为了改善矩形截面直角弯管内流场均匀性,利用 FLUENT 软件对弯管内流体流动情况进行数值模拟计算,分析了不同数量和不同结构导流板的布置对弯管内流场均匀性、局部阻力和能量损失的影响。结果表明:弯管内未加装导流板时,流速分布不均匀、出现涡流和二次流,而布置导流板后可以有效提高流场均匀性;布置合理数量的导流板不仅能有效改善流场均匀性、完全消除因直角弯头引起的涡流和二次流,而且能大幅度减小流动阻力和能量损失。通过对3种不同设计方案的导流板进行数值模拟分析,获得最优的导流板数量和结构。

关键词:直角弯管;流场均匀性;导流板;数值模拟

中图分类号:TM 621 **文献标志码:**B **文章编号:**1674-1951(2019)08-0032-06

Abstract: In order to improve the flow field uniformity in a right-angle bent tube with rectangular section, the fluid flow in the elbow was numerically simulated by FLUENT software. The effects of the uniformity of flow field and local resistance and energy loss in the elbow were analyzed by using different quantities and structures of flow deflectors. The results show that the velocity distribution is not uniform, vortex and secondary flow occurs when the flow deflectors are not installed in the elbow, while the uniformity of flow field can be effectively improved after arranging the deflector plates; using a reasonable number of baffles can not only effectively improve the flow field uniformity and completely eliminate the vortex and secondary flow caused by the right-angle elbow, but also greatly reduce the flow resistance and energy loss. Through the numerical simulation analysis of the deflectors of three different design schemes, the optimal number and structure of the deflectors are obtained.

Keywords: right-angle bent tube; flow field uniformity; deflectors; numerical simulation

0 引言

管道系统广泛应用于工业各个领域,如锅炉送风系统、选择性催化还原技术(SCR)脱硝系统、烟道系统、建筑热能通风系统、输油管线等^[1-2]。弯管是管道系统重要组成构件,具有改变传输介质流向的功能。在实际的管道安装工程中,管道系统的设计经常受场地空间的限制,管道走向常出现弯折和收扩,从而导致管道内流场紊乱,流速分布极不均匀,常伴有涡流和二次流,使得测量元件无法准确测量^[3-6]。随着节能减排要求的提高,对烟气脱硫脱

硝效率和烟风煤粉系统节能的要求越来越高,火电厂烟道、煤粉管道、风道和其他相关管道存在大量的弯管,而这些弯管不仅改变流速方向,使得测量结果不准及动态特性差,同时影响系统安全经济运行。

为了改善弯管内流场均匀性,提高测量准确度,通常在弯管内部安装导流装置对流场进行调整,使流速方向能正对测量元件。目前国内外对弯管内流体流动特性的研究大多数集中在90°圆弧形弯管^[7-8]及其他复杂结构管道^[9-11],而对于矩形截面直角弯管内置导流装置的研究还很少。

由于矩形截面直角弯管内流速分布较90°圆弧形弯管复杂,一般通过常规试验很难分析其内部流体流动情况,许多学者利用 FLUENT 软件通过计算

流体动力学(CFD)数值模拟计算方法对流体流动特性进行深入分析和研究。本文采用 CFD 数值模拟计算方法对矩形截面直角弯管进行建模,对布置导流板前后管内流场进行分析,并利用数值方法对导流板进行优化设计,选取了合适的导流板结构和数量,为矩形截面直角弯管的流场改善提供了参考方案。

1 计算模型的建立

1.1 几何模型

矩形截面直角弯管的三维几何模型如图 1 所示。管道模型含有 1 个直角弯头,管道截面尺寸为 $1\ 200\ \text{mm} \times 1\ 400\ \text{mm}$,直角弯头下游水平直管段长度为 $5\ 400\ \text{mm}$ 。为研究流体流经直角弯头后水平直管段不同位置的流场情况,分别选取距离直角弯头出口 $1\ \text{m}$, $3\ \text{m}$ 和 $5\ \text{m}$ 处的管道截面作为研究对象。

由于直角弯头的扰动作用,流体流经弯头后容易造成水平直管段内的流场紊乱,流速分布极不均匀,从而使得流量测量结果不准且动态特性差。为提高测量结果的准确度,在矩形截面上按照网格法等面积多点测量原理^[12],在参考截面上各布置 25 个测点。

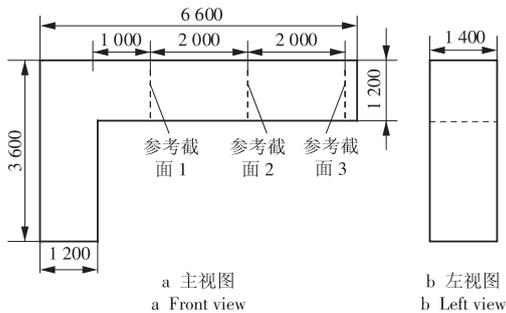


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

1.2 数值方法

使用 ICEM 前处理软件对管道模型进行三维非结构四面体网格划分,同时在拐弯处进行了局部网格加密处理,网格总数为 462 401。

通常工业管道内的马赫数 < 0.3 ,可认为管道内的流体流动为定常不可压缩的湍流流动^[13]。考虑到流体流过直角弯头后流动情况复杂,采用重整化群(RNG) $k - \varepsilon$ 湍流模型^[14],近壁处采用标准壁面函数法处理;流体材料为空气,密度为 $1.225\ \text{kg}/\text{m}^3$;入口边界条件为速度入口,出口边界条件为自由流出(适用于出口边界处流速和压力均未知的情况);壁面处采用默认的无滑移边界条件,粗糙度常数为 0.5;压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,为提高计算的准确度,采用二阶迎风格式,收敛残差小于 10^{-4} 。

1.3 均匀性评价指标^[15]

采用图 1 的 3 处参考截面上的速度相对标准偏

差 C_v 作为衡量截面上流场均匀性的量化指标,也可以用来比较截面上流场均匀性的改善程度, C_v 值越小,流场均匀度越高

$$C_v = \frac{S_v}{\bar{v}} \times 100\% \quad (1)$$

$$S_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (2)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3)$$

式中: S_v 为截面上速度标准偏差; v_i 为第 i 个测点的速度值; \bar{v} 为截面上所有测点的平均速度, m/s ; n 表示测点个数。

2 计算结果与分析

分别设置入口速度为 $5 \sim 30\ \text{m}/\text{s}$,间距为 $5\ \text{m}/\text{s}$,共 6 组试验方案。对这 6 组试验方案求解区域进行数值模拟计算,得到管道内流场均匀性指标和进出口压降值见表 1。可以看出 3 处参考截面的速度相对标准偏差均达到 50% 以上,流场均匀性差;随着水平直管段长度的增加,参考截面的速度相对标准偏差有所减小,但还是无法满足流体流量被准确测量所需要的流场均匀性;随着入口流速增大,管道进出口压降大幅度增加,从 $22.23\ \text{Pa}$ 增加到 $877.36\ \text{Pa}$,从而导致系统能量损失也大幅度增加。

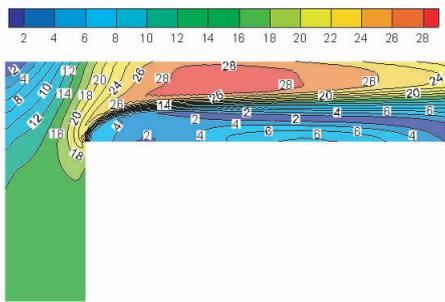
表 1 不同入口速度下流场均匀性指标和进出口压降

Tab. 1 Flow field uniformity index and inlet and outlet pressure drop at different inlet velocities

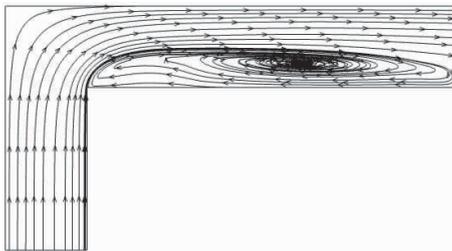
入口速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	速度相对标准偏差/%			进出口压 降/ Pa
	参考截面 1	参考截面 2	参考截面 3	
5	65.49	62.02	50.45	22.23
10	72.04	64.18	56.28	92.96
15	64.64	65.24	57.60	216.41
20	73.45	65.22	54.82	369.23
25	72.68	64.73	58.65	604.52
30	72.84	66.67	59.71	877.36

利用 Tecplot 后处理软件,对数据文件进行可视化处理。入口速度为 $15\ \text{m}/\text{s}$,无导流板时速度分布云图和流线图如图 2 所示。由图 2a 可以看出气流流经直角弯头后,水平直管段内速度分布极不均匀,外侧流速明显高于内侧流速,流速变化范围较大。由图 2b 可以看出气流流过内部拐角后在水平直管段内侧壁面附近形成较大面积的局部涡流区,这是由于气流流过拐弯处后,在离心力和惯性力的共同作用下,管道内壁流体不再继续沿着壁面流动,从而容易在拐弯后的内侧壁面附近形成局部涡流区。这些因素使得流体流过直角弯头后形成较差的流场均

匀性,容易造成测量结果波动较大,数值测量不稳定,加大了流体流量准确测量的难度。



a 速度分布云图
a Speed distribution cloud map



b 流线图
b Streamline figure

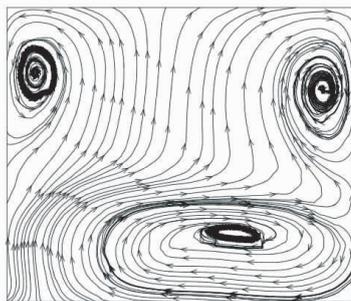
图 2 无导流板时速度分布云图和流线图
Fig. 2 Speed distribution cloud and streamline diagram without deflectors

3 处参考截面上流线图如图 3 所示。可以看出:参考截面上出现二次流,速度方向出现很大的偏转,无法正对着测量元件,从而造成测量偏差较大、波动剧烈等问题;随着直管段长度的增加,漩涡变小直至最后消失,流场逐渐变得稳定。说明了要实现流体流量的准确测量,必须要有足够长的直管段才能保证测量的准确度。而对于现场有限的直管段长度,要实现流体流量的精确测量,需布置导流装置来提高直角弯管内流场均匀性。

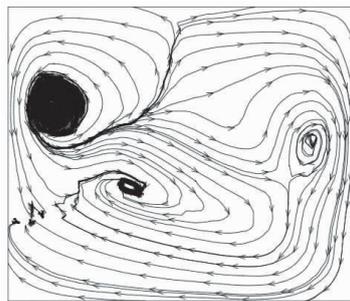
3 导流板设计方案的数值研究

3.1 设计方案 1

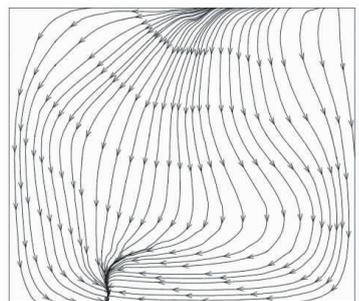
导流板设计为圆弧形,弧度为 90°,均匀分布在



a 参考截面 1
a Reference section 1



b 参考截面 2
b Reference section 2



c 参考截面 3
c Reference section 3

图 3 各参考截面上的流线图

Fig. 3 Streamline diagram on each reference section

90°弯折处。为了分析弧形导流板的数量对流场均匀性的影响,分别设置弧形导流板数量为 1~8 块。5 块等距分布的弧形导流板安装示意图如图 4 所示,其大小和形状均相同,圆弧半径为 200 mm。

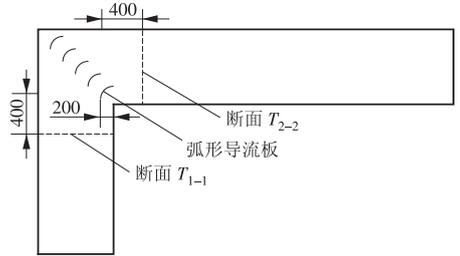


图 4 5 块等间距分布的弧形导流板安装示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the installation of five equally spaced arc deflectors

针对 8 种不同数量的弧形导流板分别建立数值仿真模型。计算过程中,入口速度为 15 m/s,其他参数设置不变,数值计算结果见表 2。加装了弧形导流板比未加教导流板时管道内流场均匀性更好,速度相对标准偏差明显减小。随着弧形导流板数量的增加,各参考截面的速度相对标准偏差均减小,流场得到进一步改善,而管道进出口压降呈先减小后增加趋势,说明了并不是导流板数量越多改善效果越好,过多的导流板减小了 90°弯折处有效流动空间,阻碍了气流流动,加剧流场的紊乱程度,使得弯管内沿程阻力增加,因此布置合理数量的导流板既能改善流场均匀性,又能使能量损失降低到最小。

表 2 设计方案 1 中流场均匀性指标和进出口压降
Tab. 2 Flow field uniformity index and inlet and outlet pressure drop in design scheme 1

导流板数量/块	速度相对标准偏差/%			进出口压降/Pa
	参考截面 1	参考截面 2	参考截面 3	
0	64.64	65.24	57.60	216.41
1	55.91	49.37	29.54	96.07
2	45.50	45.00	25.73	81.36
3	43.15	36.44	22.94	72.09
4	44.50	34.04	22.18	69.51

续表

导流板数 量/块	速度相对标准偏差/%			进出口压 降/Pa
	参考截面 1	参考截面 2	参考截面 3	
5	44.11	29.36	20.79	64.83
6	44.91	29.83	20.27	62.59
7	46.00	27.52	19.54	60.05
8	45.16	26.12	19.40	63.01

在上述仿真实验中进一步计算直角弯头内置导流板的局部阻力系数。管道模型 90° 弯折处断面 T_{1-1} 与 T_{2-2} 的位置如图 4 所示。根据式(4)计算导流板在弯管模型 90° 弯折处的局部阻力系数 ζ_{90° [16], 结果见表 3。

$$\zeta_{90^\circ} = \frac{p_{T_{1-1}} - p_{T_{2-2}}}{\rho v_{T_{1-1}}^2 / 2}, \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度, 取 1.225 kg/m^3 ; $v_{T_{1-1}}$ 为断面 T_{1-1} 的平均风速, m/s ; $p_{T_{1-1}}$, $p_{T_{2-2}}$ 分别为测试断面 T_{1-1} , T_{2-2} 处的静压, Pa 。

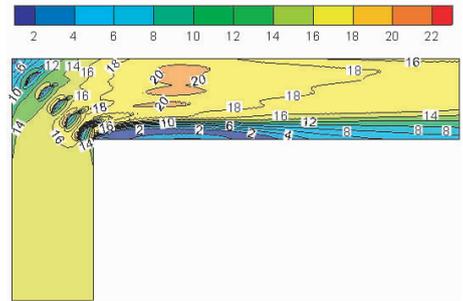
表 3 设计方案 1 中局部阻力系数 ζ_{90° Tab. 3 Local resistance coefficient ζ_{90° in design scheme 1

导流板数 量/块	$p_{T_{1-1}}/\text{Pa}$	$p_{T_{2-2}}/\text{Pa}$	$v_{T_{1-1}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	ζ_{90°
0	-3.66	-271.59	15.01	1.942
1	-2.49	-175.31	14.99	1.256
2	-2.53	-142.06	14.99	1.010
3	-2.52	-124.59	14.98	0.888
4	-2.51	-117.90	14.98	0.840
5	-2.51	-109.48	14.98	0.778
6	-2.50	-104.79	14.98	0.744
7	-2.50	-98.41	14.98	0.698
8	-2.50	-100.11	14.98	0.710

由表 3 可以看出, 布置弧形导流板较未布置导流板其局部阻力系数 ζ_{90° 有所减小, ζ_{90° 从 1.942 减小至 0.698 ~ 1.256; 当弧形导流板数量从 1 块增加到 7 块时, ζ_{90° 从 1.256 减小到 0.698; 当弧形导流板增加到 8 块时, ζ_{90° 出现小幅度增加, 从 0.698 增加到 0.710。由此说明在管道 90° 弯折处布置弧形导流板后, 不仅可以引导气流的流动, 减小高速区和低速区, 同时还可以降低系统的压力损失 [17]。随着弧形导流板数量的增加, ζ_{90° 先减小后增加, 说明数量过多的导流板会阻碍流体流动, 使其局部阻力增加。因此需要在弯头处布置合理数量的导流板, 以达到最佳的导流效果。

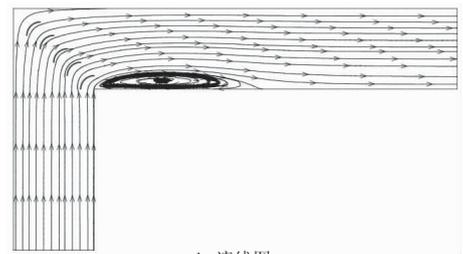
布置 5 块弧形导流板后速度分布云图和流线图如图 5 所示, 由图 5a 中可以看出: 增加导流板可以有效减小水平直管段内高速区, 使流速范围进一步缩小, 流场均匀性得到进一步改善。由图 5b 可以看出: 布置弧形导流板后, 水平直管段内侧还存在涡

流, 不过涡流区域较未加装导流板要小, 说明弧形导流板的布置可以改善流场, 调整速度方向。由于布置弧形导流板后水平直管段内还存在涡流, 而且从表 2 得到的参考截面速度相对标准偏差均大于 15%, 说明弧形导流板对于改善直角弯管内流场均匀性还存在不足, 需对弧形导流板进行优化设计。



a 速度分布云图

a Speed distribution cloud map



b 流线图

b Streamline figure

图 5 布置 5 块弧形导流板后速度分布云图和流线图

Fig. 5 Speed distribution cloud and streamline diagram after installing five arc guide deflectors

3.2 设计方案 2

针对弧形导流板不能完全消除水平直管段内产生的涡流, 流场均匀性无法满足测量元件对流体流速和流量准确测量的要求, 考虑在 90° 圆弧板后端加装直板, 直板长度等于圆弧半径。从上述试验结果可知, 导流板数量过多或过少均匀效果均不理想, 故重点分析 4 ~ 7 块导流板所产生的导流效果。

分别在 90° 弯折处等间距布置 4 块、5 块、6 块和 7 块弧直形导流板, 对这 4 种模型进行仿真试验, 入口速度为 15 m/s , 其他参数设置不变, 计算结果见表 4。对弧形导流板进行优化设计后, 水平直管段内流场均匀性得到大幅度提高, 速度相对标准偏差保持在 8% 以内, 进出口压降大幅度减小; 随着弧直形导流板数量的增加, 进出口压降呈微弱的减小趋势, 变化幅度对实验结果影响不大。

布置 4 ~ 7 块弧直形导流板后其局部阻力系数 ζ_{90° 见表 5, 相比方案 1 设计的弧形导流板, 方案 2 设计的弧直形导流板能进一步减小气流在管道弯折处产生的局部阻力, 从而进一步降低系统能耗。

设置 5 块弧直形导流板后速度分布云图和流线图如图 6 所示, 由图 6a 中可以看出: 在圆弧板后加

表 4 设计方案 2 中流场均匀性指标和进出口压降

Tab. 4 Flow field uniformity index and inlet and outlet pressure drop in design scheme 2

导流板数量/块	速度相对标准偏差/%			进出口压降/Pa
	参考截面 1	参考截面 2	参考截面 3	
4	5.75	7.07	7.54	54.25
5	6.97	5.78	6.81	53.20
6	6.88	6.27	7.27	52.66
7	7.53	6.29	7.35	52.11

表 5 设计方案 2 中局部阻力系数 ζ_{90° Tab. 5 Local resistance coefficient ζ_{90° in design scheme 2

导流板数量/块	p_{T1-1}/Pa	p_{T2-2}/Pa	$v_{T1-1}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	ζ_{90°
4	-2.83	-74.76	14.99	0.523
5	-2.74	-64.03	14.99	0.445
6	-2.65	-56.39	14.99	0.390
7	-2.62	-51.02	14.99	0.352

装直板,可以有效地减小导流板尾部对流场的扰动,提高了导流的分流能力,大幅度减小了管道内流速范围,使得水平直管段内流场均匀性能到明显改善。由图 6b 可以看出:布置弧直形导流板后,水平直管段底部涡流区消失,流速方向能正对于测量元件,提高了流体流速和流量测量的准确度。

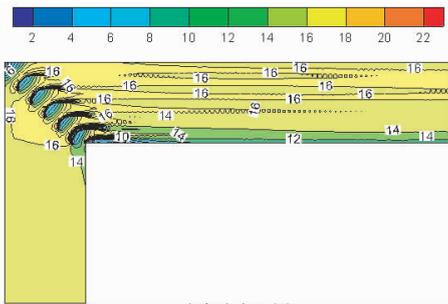
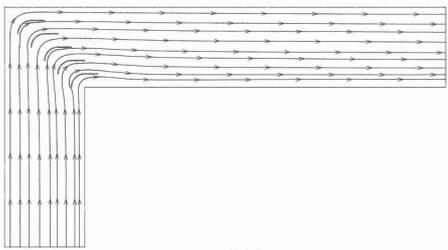
a 速度分布云图
a Speed distribution cloud mapb 流线图
b Streamline figure

图 6 布置 5 块弧直形导流板后速度分布云图和流线图

Fig. 6 Speed distribution cloud and streamline diagram after installing five arc straight deflectors

3.3 设计方案 3

对方案 2 设计的弧直形导流板进行进一步优化,在弧直形导流板前端加装等半径长度的直板,构

成直弧直形导流板。

为了与方案 2 设计的弧直形导流板的导流效果进行对比,采用相同的条件对等间距布置的 4~7 块直弧直形导流板模型进行仿真实验,计算结果见表 6。与表 4 的实验结果进行对比分析,可以看出:相比弧直形导流板,直弧直形导流板可以进一步改善流场,尤其当气流流过 90° 弯折处后的水平直管段较短距离的流场改善比较明显,进出口压降均减小了 10 Pa 左右,说明直弧直形导流板产生的局部阻力和局部能量损失更小。

表 6 设计方案 3 中流场均匀性指标和进出口压降

Tab. 6 Flow field uniformity index and inlet and outlet pressure drop in design scheme 3

导流板数量/块	速度相对标准偏差/%			进出口压降/Pa
	参考截面 1	参考截面 2	参考截面 3	
4	5.45	5.92	7.37	41.58
5	4.77	6.20	7.18	40.86
6	5.16	6.10	7.08	42.58
7	5.24	6.68	7.12	44.65

布置 4~7 块直弧直形导流板后其局部阻力系数 ζ_{90° 见表 7,对比表 5 中的实验结果,可以看出:相比弧直形导流板,直弧直形导流板可以进一步减小气流流动的局部阻力,从而进一步减小局部能量损失,降低系统能耗。

表 7 设计方案 3 中局部阻力系数 ζ_{90° Tab. 7 Local resistance coefficient ζ_{90° in design scheme 3

导流板数量/块	p_{T1-1}/Pa	p_{T2-2}/Pa	$v_{T1-1}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	ζ_{90°
4	-4.12	-56.97	15.03	0.382
5	-3.32	-49.01	15.01	0.331
6	-2.99	-44.39	15.00	0.300
7	-2.82	-43.02	14.99	0.291

布置 5 块直弧直形导流板后速度分布云图和流线图如图 7 所示,可以看出:在圆弧板前端加装直板,有效地减小了圆弧板前端对流场的扰动,提高了导流的分流能力,使得气流的速度方向得到进一步调整,因此水平直管段内流场均匀性能到进一步改善。

方案 3 设计的直弧直形导流板的均流效果要好于弧形导流板和弧直形导流板,既能保证水平直管段内速度相对标准偏差在 8% 以内,还能使系统能量损失降低到更小。通过对表 6 和表 7 的试验结果进行对比分析,并从经济角度考虑,为尽量减少钢材消耗量,在直角弯头处布置 5 块等间距分布的直弧直形导流板较为合理。

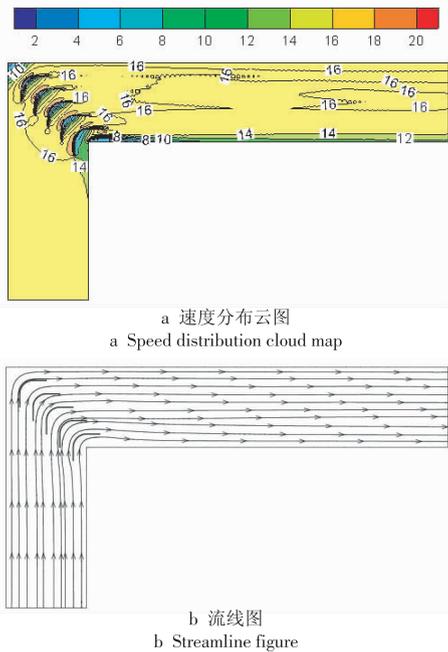


图 7 布置 5 块直弧直形导流板后速度分布云图和流线图

Fig.7 Speed distribution cloud and streamline diagram after installing five straight arc straight deflectors

4 结论

通过对直角弯管内部未布置导流板和布置不同数量和结构的导流板的流场情况进行数值模拟分析,可以得出以下几点结论。

(1) 直角弯管内未布置导流板时,水平直管段内速度相对标准偏差达到 50% 以上,流速变化范围较大,且出现涡流和二次流;随着入口流速的增大,进出口压降明显增加,系统能量损失也明显增加。

(2) 在直角弯管内布置导流板后,流场均匀性得到显著提高,进出口压降大幅度减小,进而使能量损失大幅度降低;水平直管段内流速方向得到有效调整,并减小甚至完全消除涡流和二次流。

(3) 对于相同的导流板结构,合理地增加导流板数量能够有效提高流场均匀性,降低弯管进出口压降和能量损失。继续增加导流板数量会增加流体流动阻力,从而增加进出口压降和能量损失。

(4) 方案 3 设计的直弧直形导流板的导流效果要好于弧形导流板和弧直形导流板,在直角弯管内布置 5 块等间距分布的直弧直形导流板较为合理。

参考文献:

- [1] 贾兴豪. 弯管导流结构的优化和数值模拟研究[D]. 重庆:重庆大学,2011:1-5.
- [2] 贾兴豪,彭向和,龙血松. 导流板改善流场的数值模拟与优化[J]. 西南大学学报(自然科学版),2011,33(3):

139-143.

- [3] 于飞,刘明,李卫东,等. 90°矩形截面弯头内置导流板的布置优化研究[J]. 动力工程学报,2015,35(2):147-152.
- [4] 刘友宏,周友鹏,彭纯,等. 变截面烟道内导流板与布风板对再热器入口流场影响[J]. 科学技术与工程,2017,17(32):356-362.
- [5] 梅振锋,陈敏,徐妙锋,等. 中速磨煤机前圆形一次风道流场模拟及优化设计[J]. 热力发电,2016,45(11):99-105.
- [6] 彭小敏,胡亮,徐亚峰,等. 大型燃煤电厂中速磨煤机入口圆形一次风道均流技术研究[J]. 中国科技论文,2017,12(11):1309-1314.
- [7] 谢振华,周艳荣. 90°方截面弯管内加装导流板的优化研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2009,17(4):566-572.
- [8] 吴义连,安恩科,周洪权,等. 导流板改善反应器流场的数值模拟研究[J]. 建筑热能通风空调,2018,38(24):194-203,347.
- [9] 于玉真,李伟亮,王绍龙,等. SCR 脱硝系统流道均流装置数值模拟与优化[J]. 中国电机工程学报,2018,38(24):194-203,347.
- [10] 李晓敏,王立军. 脱硝 SCR 系统仿真模拟情况下的导流板试验应用分析[J]. 环保科技,2017,23(4):5-9,23.
- [11] 邹洋,韩志江. 复杂烟风道结构中导流板的布置分析[J]. 锅炉技术,2017,48(1):11-13.
- [12] 电站锅炉性能试验规程:GB/T 10184—1988[S].
- [13] 朱宪然,赵振宁,张清峰. 数值模拟方法测量和标定中速磨煤机直吹式制粉系统一次风量[J]. 华北电力技术,2011(4):1-4.
- [14] 张师帅. 计算流体力学及其在应用—CFD 软件的原理与应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2011.
- [15] 李坦,靳世平,黄素逸. 流体速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电,2013,42(11):60-63,92.
- [16] 任锐,李杰,王亚琼. 隧道通风系统 90°弯折处导流板设置研究[J]. 中国公路学报,2018,8(31):137-144.
- [17] 杜军,张艳,施红. 柴油机烟道导流板设计模型与实验研究[J]. 舰船科学技术,2018,40(6):73-78.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

王周君(1995—),男,云南临沧人,在读硕士研究生,从事传感器技术研究方面的工作(E-mail:2486858869@qq.com)。

黎星华(1993—),男,江西抚州人,在读硕士研究生,从事流速分布不均匀流场流量测量装置研究方面的工作。

唐立军(1986—),男,湖南永州人,高级工程师,工学硕士,从事多元信息融合方面的工作。

段泉圣(1962—),男,北京人,教授,博士,硕士研究生导师,从事先进传感器技术与信息处理方面的工作。