

弯管二次流及电厂锅炉均流技术的研究进展

张维蔚¹, 吕 凡¹, 庄晓凤², 魏瑾瑜¹

(1. 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 北方联合电力包头第二热电厂, 内蒙古 包头 014030)

摘 要: 对弯管二次流的研究因弯管技术在各工程领域的广泛应用而得到了发展。本研究在总结国内外大量文献资料的基础上, 首先对弯管二次流形成原因、流动特性及研究方法(实验研究法、数值分析法和计算流体动力学研究法)进行了综述; 其次, 分析了弯管二次流对电厂锅炉烟风系统及锅炉经济运行的影响; 最后, 总结了电厂锅炉送风系统和 SCR 反应器烟道内采用的弯管均流技术, 并针对大尺寸弯管内高雷诺数湍流流动均流技术进一步研究进行了展望。

关 键 词: 二次流; 弯管; 迪恩涡; 均流技术; 锅炉

中图分类号: TK221 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.001

引 言

锅炉机组在设计、建造过程中, 考虑空间的有效利用, 烟风系统存在很多弯曲管道, 以下简称弯管。由于弯管的结构特点, 管内流体流动时呈现复杂的流动特性, 如速度分布不均、气固两相流在弯管附近形成分离区等。这些流动特性会造成流体总压和能量损失, 影响流量测量的准确性。如果流体中携带固体颗粒, 还会引起颗粒物沉积、局部磨损严重等问题, 最终影响锅炉的经济运行。因此, 这些问题自 1927 年被提出至今, 弯管内流体的流动及如何改善流动状况一直受到研究者的关注。

大量的理论和实验研究发现, 弯管内之所以出现不同于线性直管的流动状态, 是由于二次流的存在。目前, 弯管二次流的研究绝大多数集中在小尺寸弯管二次流流动结构的研究上, 涉及大尺寸弯管内湍流流动的研究较少。本文主要总结国内外在小尺寸弯管内流体流动这一领域的研究成果及电厂锅炉机组中大尺寸弯管均流技术的研究进展, 为今后大尺寸弯管内流体流动及均流技术的进一步研究提供借鉴。

1 弯管二次流

1.1 产生原因及流动形式

在流体工程中, 流体流动时只要有使流体产生偏离其主流方向的力(如离心力)或边界条件(如弯曲管道)存在, 就会产生偏离流体主流方向的流动或移动, 称为二次流^[1]。

弯管二次流主要指迪恩涡, 是由于流体流过弯管时, 受到的离心力指向弯管外侧, 因此流体在沿管道轴线流动的同时, 还向弯管外侧流动。管道中心流体的速度较大, 受到的离心力也大, 因而以较大的次流速度向外侧流动。由于流动的连续性, 管道上下附近的流体被迫向管道内侧流动, 因此会在管内产生两个旋转方向相反的涡旋, 如图 1 所示。

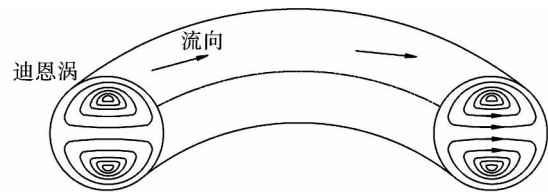


图 1 迪恩涡的形成过程

Fig. 1 Formation process of a Dean vortex

弯管二次流最早是由 Thomson 观察到的^[2]。之后, 迪恩对弯管二次流进行了理论分析^[3-4], 并提出一个无量纲数——迪恩数:

$$D_n = Re \times (a/R_c)^{0.5} \quad (1)$$

式中: Re —雷诺数, a —弯管管径, R_c —弯管曲率半径。

迪恩数是弯管内流体流动的离心力和粘性力的比值, 可用来衡量迪恩涡的强度。

收稿日期: 2014-06-23; 修订日期: 2014-07-08

作者简介: 张维蔚(1978-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 内蒙古工业大学能源与动力工程学院讲师。

随着研究的深入,研究者发现弯管二次流不仅局限于一对反向对称涡旋的流动形式(以下简称两涡),在特定条件下还会出现两对反向对称涡旋的二次流形式(以下简称四涡),出现的第二对涡旋更靠近弯管中心外侧,结构如图2所示。Akiyama等在试验中观察到了四涡二次流^[5-8],Cheng等通过理论分析也得到了四涡二次流的流动结构^[9-13],但不同研究者发现四涡二次流的条件稍有不同,具体如表1所示。研究发现,两涡二次流是稳定的,四涡二次流由于涡旋的相互影响变得不稳定,靠近弯管中心外侧的两涡会最终合并,直到形成稳定的两涡二次流。

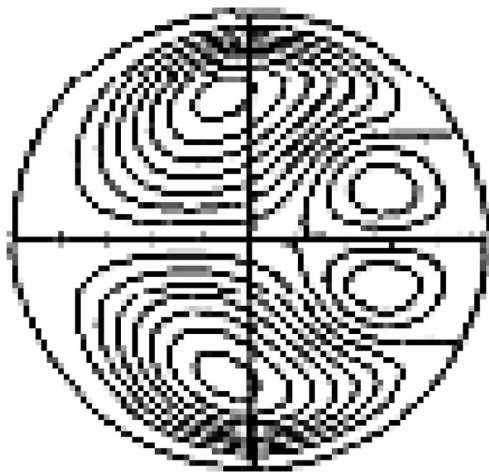


图2 弯管内四涡二次流流线图

Fig. 2 Chart showing the streamlines of secondary flow-caused four vortices in a bent tube

表1 四涡二次流出现的条件

Tab. 1 Conditions for secondary flow-caused four vortices to take place

	管道结构	临界迪恩数	研究方法
文献[5]	矩形弯管	78	实验研究
文献[6]	矩形弯管	98	实验研究
文献[7]	矩形弯管	95	实验研究
文献[8]	矩形弯管	97	实验研究
文献[9]	矩形弯管	202 ~ 520 (大于520, 增加的两涡消失)	理论研究
文献[10]	矩形弯管	143	理论研究
文献[11]	圆形弯管	956	理论研究
文献[12]	矩形弯管	93	理论研究
文献[13]	圆形弯管	956	理论研究

1.2 弯管二次流研究方法

在现有文献中,弯管二次流的研究方法大致分为实验研究法、数值分析法和计算流体动力学研究法。

1.2.1 实验研究法

弯管二次流的实验研究可分为接触式测量和非接触式测量两种方法。

(1) 接触式测量法

接触式测量法是将测速装置置于流场内进行速度测量,如旋转探针、热线风速仪等。许承等利用热线风速仪对雷诺数 $Re = 4.8 \times 10^5$ 的方形截面 90° 弯管内的流场特性进行了实验研究^[14],计算了内、外壁面压力值,发现弯管内壁面压力低于外壁面压力。尚虹等采用热线风速仪对曲率半径比 $R_c/r = 1.74$ 的圆形截面 90° 弯管内的紊流流场进行了测量^[15],给出了不同雷诺数下弯管内轴向截面的时均速度、紊流动能以及总压、静压沿曲率半径方向的分布。Sudo等采用旋转探针技术对曲率半径比 $R_c/r = 4$ 的圆形截面 90° 弯管内、流体从水平到垂直向下流动的紊流流场进行了实验研究^[16],给出了轴向截面的速度等值图、矢量图以及雷诺应力等值图等。

(2) 非接触式测量方法

非接触式测量法包括流体可视法和激光设备测试法。其中,流体可视法是在流体中加入染色剂,通过摄像方式拍摄管内二次流。研究者为了不影响管内流体的流动,会选用与流体物性相似的染色剂。Masliyah通过流体可视法观测了半圆形截面弯管内的二次流^[17],该实验以加入荧光剂墨水的蒸馏水作为实验流体。实验发现,当 $D_n = 121$ mm 时可观察到两涡二次流,如果此时在上游插入一根直径 0.8 mm 的导线就可观察到明显的四涡二次流。Kyoji等采用流体可视法研究了矩形截面 180° 弯管内的二次流^[18],实验流体是加酒精的水。

激光设备测试法是采用激光类测试设备,如LDV(激光多普勒测速仪)这是目前技术较先进的一种实验测试方法。1982年,Taylor等采用LDV对方形截面 90° 弯管内层流和湍流条件下的流场进行了试验研究^[19],给出了层流和湍流两种流态下的时均速度分布及弯曲段壁面的压力分布,并明确提出弯管内存在较大的压力梯度,且存在垂直于来流方向的二次流。Hille等采用LDV测试了曲率半径比 $R_c/r = 12.9$ 的矩形截面 180° 弯管内充分发展的层流流场^[7]。实验发现,迪恩数在 150 - 300 之间可以

观测到四涡二次流。马材芬、史峰等测量了曲率半径比 $Rc/r = 3.38$ 的矩形截面弯管内的湍流流动^[20-21]。实验发现,如果进入弯管前流体处于发展阶段,则在弯管内形成的二次流比充分发展紊流条件下的二次流更强烈。受弯管二次流的影响,湍流存在强烈的各向异性,且沿管程的脉动流和平均流之间有强烈的能量交换。

1.2.2 数值分析法

(1) 摄动法

摄动法是一种古老且行之有效的渐进分析方法,它能给出简化的近似分析解,用来对物理问题进行定性和定量讨论。迪思最早利用摄动法研究了弯管二次流^[3-4],通过分析得出当 $D_n \geq 36$ 时,流体会出现不稳定现象。后来学者便将 $D_n \approx 36$ 作为低雷诺数下方形截面弯管中的 Poiseuille 流和较高雷诺数下对称涡旋(迪恩涡)的区分标准。

(2) 谱方法

谱方法源于经典的 Ritz-Galerkin 方法,以整体无限光滑的函数系作为基底的 Galerkin 方法和配置法统称为谱方法。谱方法的基本思想十分古老,现代电子计算机的迅猛发展和快速 Fourier 变换的出现,大大减少了谱方法的计算量,才使其有了实用价值^[22]。Shinichiro 等采用 Fourier-Chebyshev 谱方法计算了 D_n 数在 90-10000 之间圆形弯管内流体的二维流动^[13]。

(3) 有限差分法

有限差分方法是一种发展较早且较成熟的数值方法,它以泰勒级数展开等方法,把控制方程中的导数代替网格节点上的函数值的差商进行离散,从而建立以网格节点上的值为未知数的代数方程组。Cheng、Ghia、Winters 等分别采用有限差分法研究了矩形弯管内充分发展的层流二次流^[9-10,12]。Dennis、Nandakumar 等采用有限差分法研究了圆形弯管内的二次流^[11,23]。

1.2.3 计算流体动力学研究法

近数十年,随着计算机技术的发展,CFD(计算流体动力学)研究文献越来越多。通过计算流体动力学,可以更形象地描述弯管内流体流动特性,更直接地分析管内迪恩涡的速度分布和压力分布情况。目前,研究者多采用计算流体动力学研究弯管湍流二次流,且湍流模型的形式较多。

史峰等利用标准 $k-\varepsilon$ 模型研究了曲率半径比

$Rc/r = 3.38$ 的大曲率、小高宽比矩形截面 90° 弯道内的湍流流动^[21]。计算结果与实验数据进行了对比,发现在弯管 $\theta = 45^\circ$ 截面上二者符合较好,当弯管 $\theta > 45^\circ$ 时存在较大的误差。

丁珏等应用 RNG $k-\varepsilon$ 模型研究了曲率半径比 $Rc/r = 4.6$ 的方形截面 90° 弯管内的湍流流动^[24],分析了不同来流攻角和来流侧滑角条件下流体的流动特性。孙业志等利用 RNG $k-\varepsilon$ 模型对不同 Re 下圆形截面 90° 弯管内空气湍流流动进行了计算^[25],分析了管内压力分布、二次流流动和壁面上压力系数的变化。

湛含辉等利用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型模拟了圆形截面 90° 弯管内的二次流。研究发现进口速度的大小直接影响迪恩涡核位置^[26],进口速度较低时涡核很规则地处于半截面的中心,随着速度的不断提高,涡核逐渐向管壁靠近。

梁德旺等采用曲率修正后的双层 $k-\varepsilon$ 模型模拟了低速高湍流度、矩形截面 90° 弯管内的湍流流动^[27]。结果显示,低速高湍流度流体在弯管内流动主要受曲率的影响。

樊洪明等采用 LES(大涡)模型对方形截面 90° 弯管内的二次流进行了数值研究^[28-29],拓宽了大涡模型在具有强曲率弯曲管道内流体流动研究中的应用范围。

此外,为了研究各种湍流模型在弯管二次流数值预测中的准确性,丁珏等分别采用 3 种湍流模型(标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型)模拟了大曲率、方形截面 90° 弯管内的湍流流动^[30]。结果显示,在强曲率弯管内湍流流动的数值模拟中,RNG $k-\varepsilon$ 模型结合两层壁面模型能更准确地求解强曲率影响的管道内及近壁区的湍流流动。董亮等在 PIV(交叉考核)试验基础上^[31],采用 6 种湍流模型(标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型、SST $k-\omega$ 模型和 LES 模型)对方形截面 90° 弯管内湍流流动进行了三维模拟。结果显示,LES 模型的计算结果与试验值吻合较好。

2 弯管二次流对锅炉运行的影响

2.1 对烟风系统的影响

2.1.1 速度分布不均的影响

流体在经过弯管时,由于离心力的作用,流体沿

轴向截面速度分布不均,靠近管壁外侧的流体速度较大,并存在涡旋。

一、二次送风管道内如果风速分布不均会造成风量测量结果准确性变差,从而影响燃料燃烧效率,导致燃烧失稳,锅炉安全性和效率降低^[32]。烟道内烟气速度如果分布不均,会使烟道内受热面管道吸热不均,热偏差增大。

2.1.2 浓度分布不均的影响

锅炉一次风系统和烟道系统中的流体属于气固两相流。研究发现^[33-36],气固两相流在弯管内流动时因惯性和离心力的作用会产生“颗粒绳索”现象,颗粒聚集在靠近弯管外壁面处,且流速明显高于气相流速。而且由于颗粒与壁面的撞击,会造成弯管前部湍流度增大。另外,与平均速度相同的单相流相比,气固两相流流过弯管时气相的湍流脉动更大。所以在一次风系统和烟道系统中,当气固两相流流过弯道时会造成烟风系统弯道外侧磨损严重,靠近烟道外侧布置的受热面磨损也会严重。

2.2 对脱硝系统的影响

烟气从锅炉尾部烟道进入脱硝系统也存在弯道,也会影响烟气速度分布的均匀性。烟气速度的均匀性对烟气与氨的均匀混合有较大的影响,会造成催化床与烟气不充分接触,导致混合气体成分偏析、催化床工作条件恶化、还原剂的无效排放等,进而影响脱硝系统经济性、导致附加的污染排放问题^[37]。

3 弯管均流技术

为减小锅炉烟风管道由于弯管二次流引起的速度分布不均、磨损和积灰等问题,需采取相应的均流措施。现有文献中,普遍采用的消除二次流的方法是在烟风管道内加装导流板。

3.1 送风管道均流技术

现有文献中,导流板在弯管内的安装位置主要在弯头处。研究者根据弯管内的速度分布、压力分布和气流湍动情况给出了导流板的具体安装角度及导流板块数,如图3所示。对于矩形截面90°弯管,樊洪明等认为在弯管入口27°到90°位置加装一块导流板可有效改善流动状况^[28]。谢振华等认为在弯管内加装三块导流板最适合^[38],其中,导流板的圆心角为70°,内侧板和中间板的起始位置为10°,

外侧板的起始位置为0°。对于圆形截面90°弯管,贾兴豪等研究了一块导流板的均流效果^[39]。

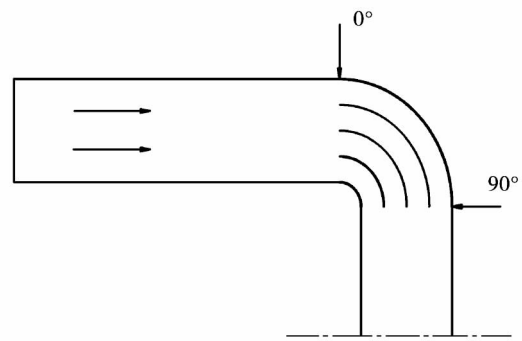


图3 弯管结构模型

Fig.3 Model for structure of bent tubes

3.2 SCR 反应器烟道均流技术

SCR(选择性催化还原)反应器内烟道的合理设计对于减小烟气系统的阻力,防止系统磨损、积灰、阻塞等十分重要。图4为SCR反应器的典型结构图,导流板的布置位置通常在烟道入口处、上升烟道转弯处、反应器上部烟道入口处,见图4中①、②、③、④、⑤。导流板的形状可分为直板导流板、弧形导流板、直弧导流板和直弧直导流板等,如图5所示。

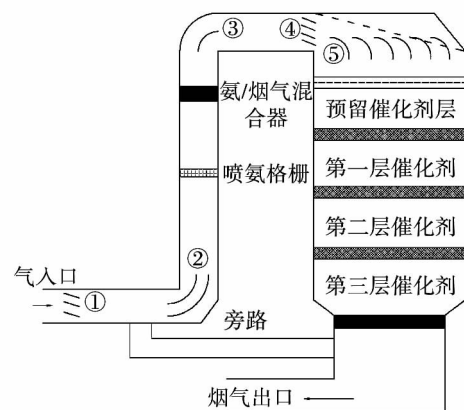


图4 SCR 系统结构模型图

Fig.4 Chart showing the model for structure of SCR systems

沈丹等对600 MW 机组的SCR反应器内流场进行数值模拟^[40],确定在③、④位置加装导流板,③位置导流板为弧形直板,④位置导流板为弧形板或

弧形直板,流场分布都相对较好。徐妍等针对300 MW机组变截面SCR反应器(反应器上部烟道入口为图4中虚线所示)^[41],提出在④位置加直弧导流板,⑤位置加直弧直导流板。周志明等提出在上升烟道转弯处③加弧形导流板^[42],导流板的间距和面积越靠近弯管外侧越大。陈莲芳等提出在600 MW机组变截面SCR反应器(图4中虚线所示)的②、③位置加装弧形导流板^[43],④、⑤位置加装直板导流板。毛剑宏等针对300 MW机组SCR反应器①位置的扩口结构提出加装直板导流板^[37],②、③、④位置加装弧形导流板;而针对600 MW机组变截面SCR反应器,提出在AIG上游①处变截面倾斜通道内加装直板导流板^[44]。

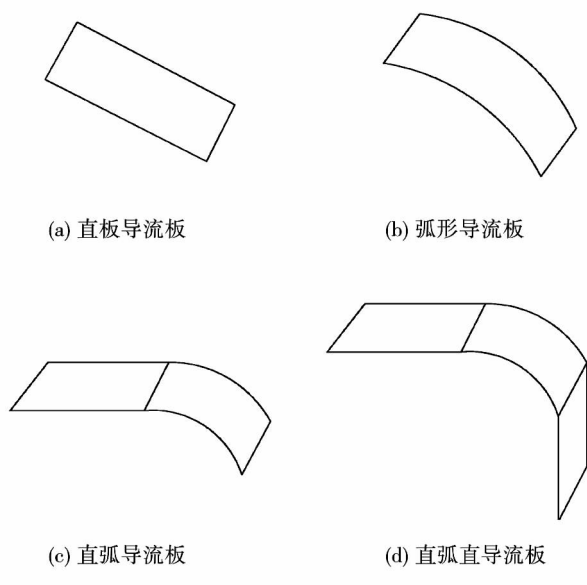


图5 导流板结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the structure of a guide plate

4 总结与展望

对近年来国内外学者在弯管二次流领域的研究进行了回顾,并分析了弯管二次流对电厂锅炉运行的影响,对电厂锅炉内目前采用的均流技术进行了总结。

弯管二次流的研究还在继续,更多研究者开始研究脉动流在弯管内的二次流流动。但目前对弯管二次流的研究主要是针对小尺寸管道内流体的层流

流动,对大型设备如电厂锅炉的大尺寸烟风管道内、高雷诺数湍流流动均流技术的研究尚处在较初级的阶段。今后弯管均流技术的研究可从以下几方面开展。

(1) 对同种类型、不同尺寸弯管,研究通用均流技术设计方法或通用计算关联式。

(2) 对大尺寸弯管内、高雷诺数湍流流动均流技术的研究。

(3) 对大尺寸弯管内气固两相流流动的研究以及均流技术的研究。

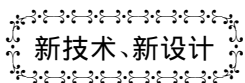
参考文献:

- [1] 湛含辉,成浩,刘建文,湛雪辉. 二次流原理[M]. 长沙:中南大学出版社,2006.
ZHAN Han-hui, CHENG Hao, LIU Jian-wen, et al. Principles of secondary flows [M]. Changsha: South China University Press, 2006.
- [2] Thomson. On the origin of windings of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes [J]. Proc. R. Soc. Lond., 1876, A25, 5-8.
- [3] Dean W. R. Note on the motion of fluid in a curved pipe [J]. Phil. Mag., 1927, 4, 208-223.
- [4] Dean W. R. The stream-line motion of fluid in a curved pipe [J]. Phil. Mag., 1928, 5, 673-695.
- [5] Akiyama M., Kikuchi K., Suzuki M., etc. Numerical analysis and flow visualization on the hydrodynamic entrance region of laminar flow in curved square channels [J]. Trans. JSME, 1981, 47, 1960-1970 (in Japanese).
- [6] Sugiyama S., Hayashi T., Yamazaki K. Flow characteristics in the curved rectangular channel (visualization of secondary flow) [J]. Bull. JSME, 1983, 26, 964-969.
- [7] Hille P., Vehrenkamp R. The development and structure of primary and secondary flow in a curved square duct [J]. J. Fluid Mech., 1985, 151: 219-241.
- [8] Bara B., Nandakumar K., Masliyah J. H. An experimental and numerical study of the Dean problem: flow development toward two-dimensional multiple solutions [J]. J. Fluid Mech., 1992, 244, 339-376.
- [9] Cheng K. G., Ran-chau Lin, Jenn-wuu Ou. Fully developed laminar flow in curved rectangular channels [J]. Journal of Fluids Engineering, 1976, 3, 40-48.
- [10] Chia K. N., Sokhey J. S. Laminar incompressible viscous flow in curved ducts of regular cross-sections [J]. Journal of Fluids Engineering, 1977, 11, 640-648.
- [11] Dennis S. C. R., Michael NG. Dual solutions for steady laminar flow through a curved tube [J]. Mech. appl. Math., 1982, 3(4): 305-324.
- [12] Winters K. H. A bifurcation study of laminar flow in a curved tube of rectangular cross-section [J]. J. Fluid Mech., 1987, 180, 343

- 369.
- [13] Shinichiro Y., Nozomi G. and Kyoji Y. Dual solutions of the flow through a curved tube [J]. Fluid Dynamics Research, 1989, 5, 191 - 201.
- [14] 许 承, 郭荣伟. 三维弯管内分离流场的试验研究[J]. 航空学报, 1994, 15(9): 1095 - 1099.
XU Cheng, GUO Rong-wei. Experimental investigation of a flow field separated inside a three-dimensional bent tube [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1994, 15(9): 1095 - 1099.
- [15] 尚 虹, 王尚锦, 席光, 袁民建. 90°圆截面弯管内三维紊流场实验研究[J]. 航空动力学报, 1994, 3(9): 263 - 266.
SHANG Hong, WANG Shang-jin, XI Guang, et al. Experimental study of a 3-D turbulent flow field in a 90° round section bent tube [J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 3(9): 263 - 266.
- [16] Sudo K., Sumida M., Hibara H. Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend [J]. Experiments in Fluids, 1998, 25(2): 42 - 49.
- [17] Masliyah J. H. On laminar flow in curved semicircular ducts [J]. J. Fluid Mech., 1980, 3(99): 469 - 479.
- [18] Kyoji Y., Xiaoyun Wu, Kazuo N., etc. Visualization of Taylor - Dean flow in a curved duct of square cross-section [J]. Fluid Dynamics Research, 2006, 38(1): 1 - 18.
- [19] Taylor A. M. K. P., Whitelaw J. H., Yianneskis M. Curved ducts with strong secondary motion: velocity measurements of developing laminar and turbulent flow [J]. Journal of Fluids Engineering, 1982, 104: 350 - 359.
- [20] 马材芬, 史 峰, 徐 忠. 90°弯道内紊流的试验研究[J]. 工程热物理学报, 1990, 11(1): 37 - 40.
MA Cai-fen, SHI Feng, XU Zhong. Experimental study of a turbulent flow inside a 90° curved duct [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1990, 11(1): 37 - 40.
- [21] 史 峰, 徐 忠, 马材芬. 大曲率弯道内湍流数值计算与测量 [J]. 空气动力学学报, 1990, 8(4): 423 - 429.
SHI Feng, XU Zhong, MA Cai-fen. Numerical calculation and measurement of a turbulent flow inside a curved duct with a large curvature [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1990, 8(4): 423 - 429.
- [22] 何松年. 谱方法及其应用 [J]. 中国民航学院学报, 2000, 6(18): 30 - 33.
HE Song-nian. Spectral method and its applications [J]. Journal of Civil Aviation College of China, 2000, 6(18): 30 - 33.
- [23] Nandakumar K., Masliyah J. H. Bifurcation in steady laminar flow through curved tubes [J]. J. Fluid Mech., 1982, 119: 475 - 490.
- [24] 丁 珏, 翁培奋. 90°弯管内流动的理论模型及流动特性的数值研究 [J]. 计算力学学报, 2004, 3(21): 314 - 321, 329.
DING Jue, WENG Pei-fen. Numerical study of theoretical models for and flow characteristics of a flow inside a 90° bent tube [J]. Journal of Computational Mechanics, 2004, 3(21): 314 - 321, 329.
- [25] 孙业志, 胡寿根, 赵 军, 仲志刚. 不同雷诺数下 90°弯管内流动特性的数值研究 [J]. 上海理工大学学报, 2010, 6(32): 525 - 529.
SUN Ye-zhi, HU Shou-gen, ZHAO Jun, et al. Numerical study of the flow characteristics inside a 90° bent pipe under different Reynolds numbers [J]. J. Shanghai University of Science and Technology, 2010, 6(32): 525 - 529.
- [26] 湛含辉, 朱 辉, 陈津端, 王 刚. 90°弯管内二次流(迪恩涡)的数值模拟 [J]. 锅炉技术, 2010, 4(41): 1 - 5.
ZHAN Han-hui, ZHU Hui, CHEN Jin-duan, et al. Numerical simulation of a secondary flow (Dean Vortices) in a 90° bent tube [J]. Boiler Technology, 2010, 4(41): 1 - 5.
- [27] 梁德旺, 王国庆, 吕 兵. 低速高湍流度弯管流动数值模拟 [J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 4(32): 381 - 387.
LIANG De-wang, WANG Guo-qing, LU Bing. Numerical simulation of a flow inside a bent tube with a low velocity and a high turbulence degree [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000, 4(32): 381 - 387.
- [28] 樊洪明, 李先庭, 何钟怡, 江 亿. 方形截面弯管二次流数值模拟 [J]. 热能动力工程, 2002, 5(17): 510 - 513.
FAN Hong-ming, LI Xian-ting, HE Zhong-yi, et al. Numerical simulation of a secondary flow inside a bent tube with a square-shaped cross-section [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & power, 2002, 5(17): 510 - 513.
- [29] 樊洪明, 何钟怡, 王小华. 弯曲管段内流动的大涡模拟 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2001, 16(1): 78 - 83.
FAN Hong-ming, HE Zhong-yi, WANG Xiao-hua. Large eddy simulation of a flow inside a bent tube section [J]. Hydrodynamics Research and Development (Edition A), 2001, 16(1): 78 - 83.
- [30] 丁 珏, 翁培奋. 三种湍流模式数值模拟直角弯管内三维分离流动的比较 [J]. 计算物理, 2003, 20(5): 386 - 390.
DING Jue, WENG Pei-fen. Comparison of a 3-dimensional separation flow inside a right-angled bent tube numerically simulated by using three turbulent models [J]. Computational Physics, 2003, 20(5): 386 - 390.
- [31] 董 亮, 刘厚林, 代 翠, 杜 辉. 不同湍流模型在 90°弯管数值模拟中的应用 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 12(40): 18 - 22.
DONG Liang, LIU Hou-lin, DAI Cui, DU Hui. Applications of various turbulent models in numerical simulation of a 90° bend [J]. J. Central China Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2012, 12(40): 18 - 22.
- [32] Fleming M. M., Long A. M. Increasing boiler efficiency through balancing secondary air flow to burners [J]. Proceedings of the American Power Conference, 1996(2): 1496 - 1500.
- [33] Kliafas Y., Houli M. LDV measurement of a turbulent air-solid two-phase flow in a 90 degree bend [J]. Experiment in Fluids, 1987, 5(2): 73 - 85.
- [34] Huber N., Sommerfeld M. Characterization of the cross-sectional particle concentration distribution in pneumatic conveying systems [J]. Powder Technology, 1994, 79(3): 191 - 210.
- [35] Yang W., Kuan B. Experimental investigation of dilute turbulent

- particulate flow inside a curved 90° bend [J]. Chemical Engineering Science, 1994, 61(11): 3593 - 3601.
- [36] 张洪军, 赵周林, YANG William, TU Jiyuan, 何春生. 90° 弯管内气固两相流湍流变动实验研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2010, 2(25): 559 - 565.
ZHANG Hong-jun, ZHAO Zhou-lin, YANG William, et al. Experimental investigation of changes in a gas-solid two-phase turbulent flow in a 90° bend [J]. Hydrodynamics Research and Development, 2010, 2(25): 559 - 565.
- [37] 毛剑宏, 宋浩, 吴卫红, 钟毅. 电站锅炉 SCR 脱硝系统导流板的设计与优化 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 6(45): 1124 - 1129.
MAO Jian-hong, SONG Hao, WU Wei-hong, et al. Design and optimization of guide plates in a SCR system of a utility boiler [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2011, 6(45): 1124 - 1129.
- [38] 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, 4(17): 566 - 572.
XIE Zhen-hua, ZHOU Yan-rong. Optimization research of guide plates additionally installed in a 90° bent tube with a square cross-section [J]. Journal of Applied Base and Engineering Science, 2009, 4(17): 566 - 572.
- [39] 贾兴豪, 彭向和, 龙血松. 导流板改善弯管流场的数值模拟与优化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 3(33): 139 - 143.
JIA Xing-hao, PENG Xiang-he, LONG Xue-song. Numerical simulation and optimization of a flow field inside an elbow improved by using guide plates [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, 3(33): 139 - 143.
- [40] 沈丹, 仲兆平, 过小玲. 600MW 电厂 SCR 烟气脱硝反应器内不同导流板的流场数值模拟 [J]. 电力环境保护, 2007, 23(1): 42 - 45.
SHEN Dan, ZHONG Zhao-ping, GUO Xiao-ling. Numerical simulation of the flow field inside a SCR flue gas denitrification reactor formed by using various guide plates in a 600 MW power plant [J]. Electric Power Environmental protection, 2007, 23(1): 42 - 45.
- [41] 徐妍, 李文彦. SCR 脱硝反应器导流板的结构设计 [J]. 热力发电, 2008, 10(37): 49 - 54.
XU Yan, LI Wen-yan. Structural design of guide plates in a SCR denitrification reactor [J]. Thermal Power Generation, 2008, 10(37): 49 - 54.
- [42] 周志明, 樊卫国, 董立春. 选择性催化还原脱硝系统烟道中导流板设计数值模拟 [J]. 重庆大学学报, 2009, 10(32): 1187 - 1192.
ZHOU Zhi-ming, FAN Wei-guo, DONG Li-chun. Numerical simulation of the design of guide plates in the flue gas ducts of a selective catalytic reduction denitrification system [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 10(32): 1187 - 1192.
- [43] 陈莲芳, 周慎杰, 王伟. 选择性催化还原烟气脱硝反应器流场的模拟优化 [J]. 动力工程学报, 2010, 3(30): 224 - 229.
CHEN Lian-fang, ZHOU Shen-jie, WANG Wei. Simulation and optimization of a flow field inside a SCR flue gas denitrification reactor [J]. Journal of Power Engineering, 2010, 3(30): 224 - 229.
- [44] 毛剑宏, 蒋新伟, 钟毅, 宋浩等. 变截面倾斜烟道导流板对入口流场的影响 [J]. 浙江大学学报, 2011, 8(45): 1453 - 1457.
MAO Jian-hong, JIANG Xin-wei, ZHONG Yi, et al. Effect of the flow guide plates in an inclined flue gas duct with a variable cross-section on the flow field at the inlet [J]. Journal of Zhejiang University, 2011, 8(45): 1453 - 1457.

(陈滨 编辑)



三菱和日立正合并其火力发电业务

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.002

据《Gas Turbine World》2013 年 11 - 12 月刊报道, 三菱和日立公司在 2013 年正式宣布一项计划, 组建新合资企业公司。

组建该合资企业的有效日期是 2014 年 2 月 1 日。该合资公司的名称将是 Mitsubishi Hitachi Power Systems Ltd(三菱 - 日立电力系统有限公司)。

Mitsubishi Power Systems Americas(三菱电力系统美国)将拥有目前为止尚未宣布的新名字。在美洲, 新的营运家族将包括加拿大、墨西哥和波多黎各的子公司。

也包括 Hitachi Power Systems Americas(日立电力系统美国)、Hitachi Power Systems Canada(日立电力系统加拿大)和 Mechanical Dynamics & Analysis Ltd(机械动力学 & 分析有限公司)。

(吉桂明 摘译)

弯管二次流及电厂锅炉均流技术的研究进展 = **Advances in the Study of the Flow Equalization Technology for the Secondary Flow in Bends and Boilers in Power Plants** [刊, 汉] ZHANG Wei-wei, LU Fan, WEI Jin-yu (College of Energy Source and Power Engineering, Inner Mongolia Polytechnic University, Huhhot, China, Post Code: 010051) ZHUANG Xiao-feng (North United Electric Power Baotou No. 2 Thermal Power Plant, Baotou, China, Post Code: 014030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014, 29(6). -603-609

The secondary flow in a bend has been studied in depth due to a wide-ranging use of the bend technology in various engineering domains. Firstly, on the basis of a large quantity of literatures both at home and abroad being summarized, an overview was given of the causes for the formation of the secondary flow in a bend and the flow characteristics and research methods (including the test method, numerical analysis method and CFD method). Secondly, the influence of the secondary flow in a bend on the flue gas and air system of a utility boiler and its economic operation was analyzed. Finally, the flow equalization technology for bends adopted in the air supply system in a utility boiler and in the flue gas duct of the SCR reactor was summarized and the prospects of the future studies in the high Reynolds number turbulent flow equalization technology in a large-sized bend were also given. **Key Words:** secondary flow, bend, Dean vortex, flow equalization technology, boiler

湍流、转捩模型对气冷涡轮气热耦合计算影响的对比研究 = **Contrast Study of the Influence of the Turbulent Flow and Transition Model on the Gas-heat Coupled Calculation of an Air-cooled Turbine** [刊, 汉] LI Tao, BIAN Xin, HUANG Hong-yan (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), MA Hai-hong (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014, 29(6). -610-616

Developed was a heat conduction solution-seeking program based on the three-dimensional non-structural grid. Through a contrast with the analytic solutions, it has been verified that the weighted least square method has a higher precision than the Green function method when seeking solutions to the gradient. The heat conduction program with a three-order precision based on the weighted least square method was coupled with the program HIT-3D for calculating the flow field in cascades to accomplish a gas-heat coupled calculation. The 5411 test conditions for MARKII blades were numerically simulated and with the help of the turbulent flow model available in the program HIT-3D, the influence of the transition on the heat transfer calculation was studied. It has been found that the temperature predicted by using the BL model has a greatest difference from the test value, being up to 10% at the transition point. As the software has an ability to simulate the transition, the temperature error in the transition zone calculated by using the BL + AGS transition model, SST-Gama model and $q-\omega$ model is relatively small, being around 5%. It can be seen that the turbulent flow models with the transition being taken into account can better predict the temper-