

DOI: 10.7652/xjtuxb201710014

某新型蒸汽脉冲式声频清灰装置的流场分析

鲁敬妮¹, 屠珊¹, 卓敏鹏², 王红娟¹, 洪振瀚¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安远能新能源科技有限公司, 710006, 西安)

摘要: 为深入研究某新型蒸汽脉冲式声频清灰装置内的流动情况,建立了清灰器三维流道几何模型,并按照几何模型的复杂程度采用分区域法划分网格。通过 Fluent 软件对清灰装置内流道进行数值模拟计算,分析不同开度下装置内流体流动特性以及开度与速度对流道压损的影响作用。研究表明:流道内压降主要用来克服狭缝区因节流造成的压损,随着开度由 20% 增大至 100%,狭缝区压力分布变化最剧烈的部位由上、下狭缝交接处逐渐上移至环形腔体与上狭缝交汇处;环形腔流道内流体由两侧对称流动,并且由两个狭长的旋涡逐渐变成绝大多数流体逆时针流动、少部分顺时针流动,旋涡数量变为一个且规模变小;流体总压降随狭缝开度增大而减小,且减小幅度随开度的增加逐渐降低,同一开度下,入口流动速度对流场总压降影响较小。结合中、大开度下清灰装置压降较小、流动稳定性较好这一情况,建议装置多在中、大开度下运行,以改善其稳定性并减少能量损耗。

关键词: 声波清灰;数值模拟;压力损失;流动特性

中图分类号: TK26 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)10-0082-06

Flow Field Analysis for a New Type of Steam Pulsed Acoustic Dust Cleaning Device

LU Jingni¹, TU Shan¹, ZHUO Minpeng², WANG Hongjuan¹, HONG Zhenhan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Future New Energy Technology Co., Ltd., Xi'an 710006, China)

Abstract: To investigate a new type of steam pulsed acoustic dust cleaning device, the geometrical model of the three-dimensional flow path is established, and the domain is meshed according to the complexity of the geometric model. The flow characteristics of the fluid in the device with different opening degrees and the effects of opening and velocity on the pressure drop of the flow channel are investigated via the numerical simulation of the flow path in the cleaning device by Fluent software. The results show that the pressure drop in the runner is mainly used to overcome the pressure loss caused by throttling. As the opening increases from 20% to 100%, the most severe pressure distribution in the slit area is gradually moved from the junction of upper and lower slit to the junction of the annular cavity and the upper slit; the flow in the annular cavity changes from symmetrical at both sides and having two narrow vortices, to the counterclockwise flow in most region and a small part clockwise, and only one smaller scale of vortex exists. As the slit opening increases, the total pressure drop in the flow field decreases, and the greater opening, the smaller change in total pressure drop. The inlet flow velocity exerts

收稿日期: 2017-01-18。 作者简介: 鲁敬妮(1993—),女,硕士生;屠珊(通信作者),女,副教授。

网络出版时间: 2017-06-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170620.1859.002.html>

less influence on the total pressure drop of the flow field. For a smaller pressure drop and a better flow stability, it is suggested that the device ought to operate at medium and large opening to reduce energy loss.

Keywords: acoustic cleaning; numerical simulation; pressure loss; flow characteristics

由于电厂常用煤的灰分含量较高,一般在 20%~40%(质量分数)之间,锅炉炉膛和烟道内的各换热器表面上会出现积灰和结渣现象。沉积在锅炉省煤器、过热器和空气预热器表面的飞灰必然导致传热热阻增大,降低传热效果,甚至堵塞烟道,严重时会影响锅炉等设备安全运行。例如:新昌电厂将原 660 MW 机组扩容改造为 700 MW 后,因所燃煤种较杂、燃煤量大,灰尘量大于原设计值,且运行中一旦出现设备检修、消缺等问题,将导致排烟温度升高,无法达标排放^[1];大唐石门电厂 300 MW 机组投运以来,折焰角位置积灰非常严重,不仅严重阻碍了受热面与烟气流的热交换,并且运行中存在塌灰,造成炉膛负压波动及煤火检被干扰,影响了机组正常运行^[2]。由此可以看出,锅炉的积灰结焦已影响到生产运行的安全性与经济性,因此锅炉必须经常除灰去垢。

目前,市场上并存的锅炉清灰装置有伸缩式蒸汽清灰器、激波式清灰器和声波清灰器。声波清灰利用气声转换装置实现机械能与声能之间的转换,经声波导管的放大,频率和声压级一定的声波通过直达、折射和反射的形式在待清灰空间区域传播,使灰粒产生周期性振荡,最终因声振疲劳,灰粒克服微团间的黏附力,在重力和气流的作用下下沉并被带走,从而实现清灰目的^[3-5]。声波清灰技术出现于 20 世纪 70 年代^[6],欧洲和美国、日本等发达国家对其广泛重视并推广使用。

1993 年,香港梓坟公司将声波清灰器介绍到国内,引起声学界的重视。通过这些年的研究和实践,国内在此方面也取得了很大进展和实际经验^[7-8]。声波清灰器以其清灰干净、不留死角,易于安装和操作,维护工作量小,维护费用低等优点广泛应用于火力发电、石油化工、水泥和冶金行业,并取得了很好的经济效益和社会效益^[9-10]。

文献[11]介绍了某悬臂式声频清灰装置对某发电公司 2 号锅炉进行清灰的情况,清灰前后锅炉主蒸汽平均温度上升 6.72℃,左右侧排烟温度平均下降约 16.35℃。按照主蒸汽温度每上升 10℃、汽轮机耗汽量减少 1.5%,排烟温度每下降 1℃、发电煤耗降低 0.23g/(kW·h)计算,年发电耗煤可以节约

160 万元以上,节能经济效益非常显著。但是,该清灰装置由于其内部流道结构复杂,在实际运行中出现噪声、振动等现象。这种由于复杂结构体带来的流动分离、绕流、喷射冲击、混合等继而带来振动噪声的现象,在工程实例中广泛存在,危及生产安全^[12-13]。基于此,本文对该新型蒸汽吹灰装置进行数值模拟计算,详细分析其流动情况。

1 模型建立

本文以某新型蒸汽脉冲式声频清灰装置作为研究对象,依据实际尺寸建立清灰器内部流道的三维几何模型。清灰器内部流道三维几何模型剖面图如图 1 所示,记来流沿 Y 轴负向进入流道,其出口方向为 X 轴正向,Z 轴方向由右手法则确定。在清灰装置内,与环形腔连接的狭缝为上狭缝,与转轴连接并随之转动的狭缝为下狭缝。由于流道结构复杂,故采用分区域非结构化网格手段对流体域进行划分。其中环形腔、上下狭缝、转轴及其与扩压段连接部分采用四面体网格进行划分,以适应该区域较为复杂的几何形状,扩压段流体区域采用六面体及楔形网格进行划分。使用 Fluent 软件计算时,采用基于压力的隐式求解器、定常流动、湍流模型为标准 $k-\omega$ 模型,计算最大残差要求小于 10^{-4} 。工质选择为水蒸汽,入口速度根据实际情况定为 30~80 m/s,温度为 284℃。本文在狭缝 80%开度下,将 40 万、60 万和 90 万规模网格数划分的流体区域进行网格无关性验证,其出口流量监测结果见表 1,可以看出,流量相对误差连续小于 5%。综合考虑计算的准确性与效率,最终确定 60 万规模网格数作为建模标准。本次数值模拟的主要目的是研究狭缝开度(即上、下两部分狭缝重叠程度)在 20%~100%时,整个流道内的压力、速度分布以及各部分压损的变化,为清灰器结构优化提供理论依据以及优化方向。

表 1 网格无关性验证结果

网格单元数	出口流量/kg·s ⁻¹	相对误差/%
40×10 ⁵	0.039 361	0.000 0
60×10 ⁵	0.039 357	0.010 1
90×10 ⁵	0.039 360	0.025 4

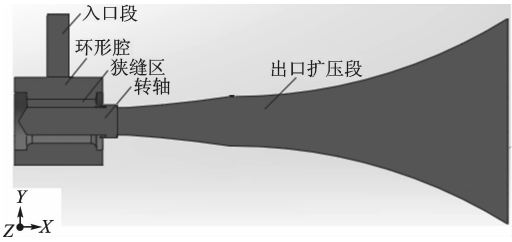
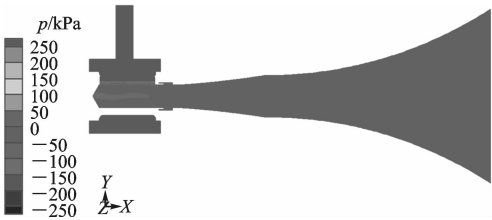


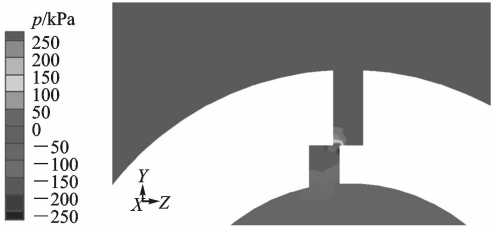
图 1 清灰器三维几何模型剖面图

2 不同开度下的流场分析

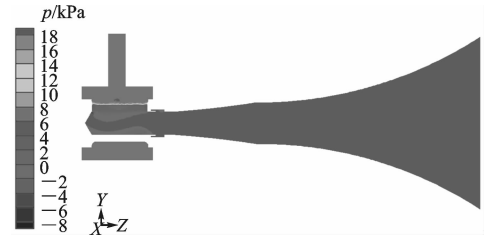
在狭缝为 20% 与 100% 开度下,清灰器内部中心截面流场静压分布见图 2。从图 2a 和图 2c 可见:入口段与环形腔体内压强分布均匀,压损较小;当流体进入狭缝区域后,由于节流作用导致压力急剧下



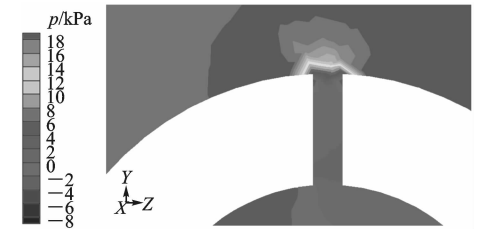
(a) 20% 开度 $Z = -0.0016$ m 截面



(b) 20% 开度 $X = -0.31773$ m 截面狭缝处



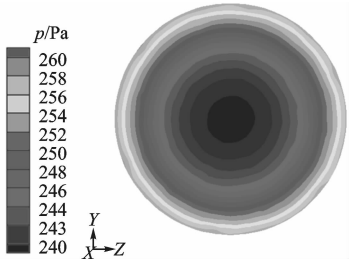
(c) 100% 开度 $Z = 0$ m 截面



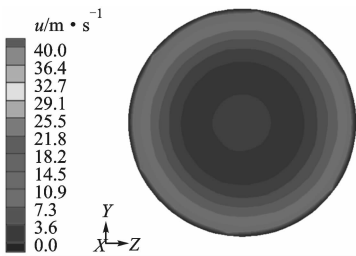
(d) 100% 开度 $X = -0.31773$ m 截面狭缝处

图 2 不同开度各计算位置处静压分布图

降,该区域是整个流道内压力变化最大的部分;转轴部分因流动阻力的存在,压强继续小幅度降低,且由轴中心向外围呈现增大趋势;当流体经过扩压段时,由于扩压作用,流体压强增大直至出口;对于同一截面,中间压强小、外围压强大,速度则与压力恰好相反,如图 3a 和图 3b 所示。



(a) 静压分布图

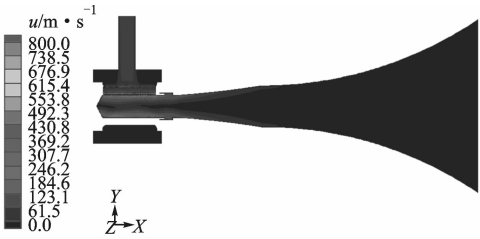


(b) 速度分布图

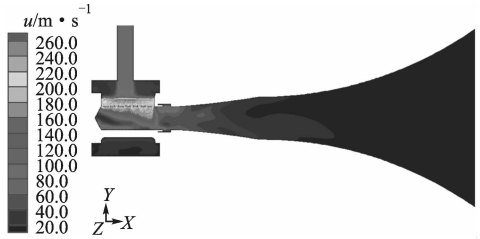
图 3 扩压段 $X = 0.3$ m 截面流场图

对比图 2b、图 2d 可以发现:在小开度时,腔体内压降变化最剧烈的部位是上、下狭缝交接处;随着开度增大,流动面积突变区向上移动,大开度时,腔体内压降变化最剧烈的部位是环形腔体与上狭缝交汇处。在清灰器开度增大过程中,整个流动区域内流体压力也不断变化,对于空间每一点均会产生压力和速度脉动,将流体的机械能转化为脉冲波振荡从而实现清灰目的。

当地声速 a 为 473.14 m/s,根据温度 $t = 284^{\circ}\text{C}$ 可以计算出:在小开度时,整个流道内只有狭缝处会出现很少部分的超声速流动,绝大部分流体区域为亚声速流动;当 100% 开度时,流道内最大速度为 263 m/s,整个区域均为亚声速流动。由图 4 可以看出,流体由清灰器入口段进入环形腔前速度分布均匀,转轴处至出口段中间速度小,两边速度大。对比两个开度下速度分布图 4a 和图 4b,发现与压强变化对应,在 20% 开度时,最大速度出现在上、下狭缝交界处,而在 100% 开度时,最大速度则出现在上狭缝入口处。对出口面速度进行分析,发现出口段最大速度分布区域与开度密切相关,随着开度由小至大变化,最大速度可出现在各个方位,这很好地解释



(a) 20%开度



(b) 100%开度

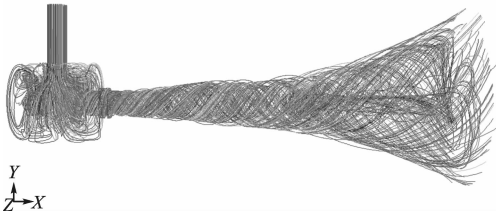
图 4 不同开度时中心截面速度分布情况

了运行现场各方位壁面均出现被冲刷痕迹这一现象。

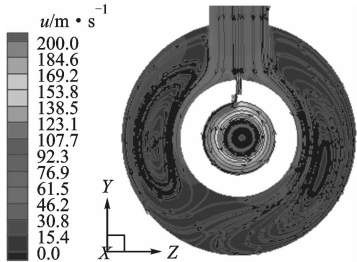
从图 5 不同截面流线图可以看出,清灰器装置内部流线多次相互缠绕,呈现出复杂的三维流动特点,而且流体在出口段并未充分发展,出现回流。进入清灰器的流体分为两部分流动,一部分经狭缝直接进入转轴向出口流动;另一部分分两股绕圆柱环形腔两侧内壁流动,两股流体撞击后,在狭缝前后压差产生的抽吸作用下进入上、下狭缝,之后两股流体在转轴空间中汇集,流向出口。由图 5b 可以看出,在 20%开度时,环形腔内由于逆压梯度两侧形成两个狭长的旋涡,这是造成阀腔中总压损失的关键区域,而且环形腔内壁由于入口流体的冲刷,对称出现了高流速低静压区。在 100%开度下,如图 5d 所示,由于狭缝开度达到最大,进入狭缝流体也达到最多,故整个腔体内大部分流体从进入环形腔后开始逆时针流动,只有少部分流体沿内侧顺时针流动,两股流体汇合后在压差作用下流入狭缝,此时腔内只有流体汇合处出现一个较小的旋涡,压损较 20%开度大幅减小。

清灰器在运行过程中,由于流动分离及逆压梯度,从入口到环形腔段流道内存在旋涡。此外,由于转轴中有负压出现,因此会产生较大的回流,从而形成大的旋涡。流体力学理论研究表明,在流动分离现象中,旋涡的形成与脱落处于无规律状态。因此,当入口速度或狭缝开度等流动条件发生变化时,旋涡会导致环形腔与转轴中的流场剧烈变化,不仅造成大量的压降损失,还会在结构中出现流体激振现

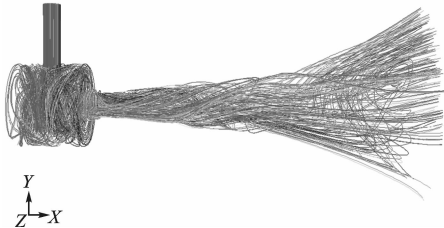
象,严重影响清灰器的稳定运行,使清灰效果变差,同时还会带来噪声、设备寿命降低等问题。



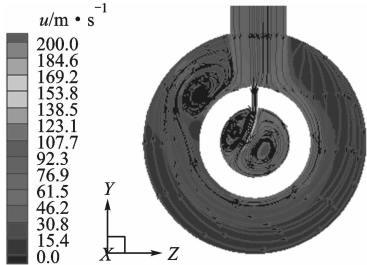
(a) 20%开度全流场



(b) 20%开度时的 $X = -0.31773\text{ m}$ 截面



(c) 100%开度全流场



(d) 100%开度时的 $X = -0.31773\text{ m}$ 截面

图 5 进口速度为 80 m/s 时不同开度特征面流线图

对比图 5b 和图 6 发现,对于同一开度,进口速

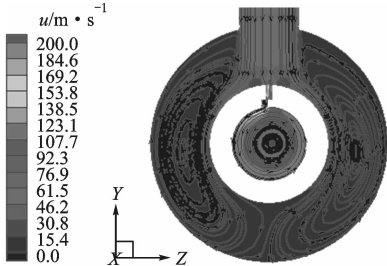


图 6 进口速度为 50 m/s 时 20%开度下的 $X = -0.31773\text{ m}$ 截面流线

度由 80 m/s 降低至 50 m/s 后,右侧环形腔内出现的狭长旋涡逐渐变小,说明低速运行对清灰器稳定性更有利。此外,在清灰器设计制造过程中,可以通过改变环形腔内通流面积发生剧变的结构,使流动趋于平稳,以减少腔内可能出现的旋涡,改善清灰器运行稳定性并降低其总体压损水平。

3 各部分压损变化分析

将整个流道按图 1 所示分为入口段、环形腔、狭缝区、转轴和出口扩压段 5 部分,分别计算每部分压损占总压损的百分比。当入口速度为 80 m/s 时,各部分压损占总压损的百分比随开度的变化如图 7 所示。从图中可以看出:环形腔、狭缝区以及转轴 3 部分压损较大;出口扩压段与入口段压降所占比例小,且随开度变化较小。除了狭缝区,其他部分压损百分比均随开度增大而增大,这是因为开度发生变化时只有狭缝区结构发生变化,因此其他部分压损变化不大,大开度时整个流道内总压损急剧变小,因此入口段、环形腔、转轴部分和扩压段压损百分比均随开度增大而增大。对于狭缝区,开度增大时其压损与总压损均在减小,故开度增大后狭缝区压损与总压损的比值小于二者的原比值。同时还可以看出:开度在 20% 到 60% 之间时,整个流道内狭缝处压损最大,压损均超过 50%;开度再增大后,转轴部分压损最大,其次是狭缝处;当开度继续增大,环形腔的压损也大于狭缝处,此时狭缝处的节流作用很小。

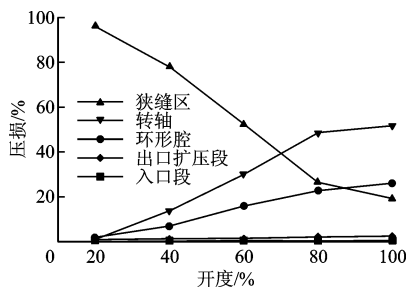


图7 压损随开度变化的关系

现选定清灰器开度为 60%,分析各部位压损百分比随入口速度的变化关系如图 8 所示。由图中可以清楚地看到:当流道结构固定时,各部分压损几乎不随速度的变化而变化。此外,狭缝区结构复杂,由于其节流作用导致压损最大,达 50% 以上;环形腔和转轴处则由于流场复杂压损也较大,进、出口两部分流道结构简单,压损很小,所占比例还不到 2%。

由于整个腔体内的压降主要用来克服狭缝前后的阻力,所以大开度时清灰装置总压降远小于小开

度时的压降。另外,结合图 5b 和图 5d 分析结果可知,大开度下腔体内部流动更稳定。因此,建议清灰装置运行时应尽量避免小开度,以提高运行的稳定性与安全性,且降低能量损耗。

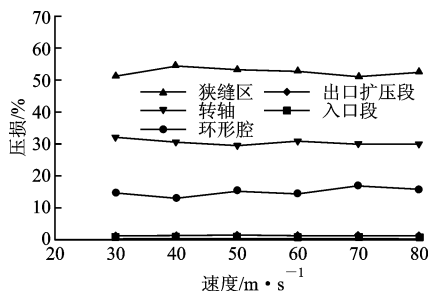


图8 压损随速度变化的关系

4 结论

某新型蒸汽脉冲式声频清灰装置耗气量低,清灰效果十分明显,节能经济效益显著,但在运行过程中会出现振动、噪声现象。本文针对这一问题进行数值模拟计算,根据该装置在不同开度下流场变化规律以及装置各部分压降随开度和速度变化关系进行分析,得出如下结论。

在狭缝开度逐渐变大的过程中,流道内进、出口压差不断减小,且由于流道结构发生变化。在 20% 开度时,上、下狭缝交接处为腔体内压降变化最大的部位;在 100% 开度时,随着狭缝重叠面积增大,环形腔与上狭缝衔接处面积突变区成为此时压降最大的部位。此外,环形腔内由小开度下两侧对称流动以及出现两个狭长旋涡变成大开度时主流与轴同向转动,且只有一个小旋涡;大开度时压损较小,开度明显降低,流动更加稳定。

由于流动过程中整个腔体内的压降主要用于克服狭缝前后的阻力,所以开度增大时,狭缝区压损百分比随之减小且变化幅度较大,其他部分压损百分比变化规律与之相反,且对于结构简单的流道其压降比例很小。各部分压损变化规律主要由流道的复杂程度决定,当流道结构(即狭缝开度)一定时,速度对其几乎没有影响。结合分析,该清灰装置在中、大开度下,流场压降较小且流动稳定性更好这一情况,建议装置多在中、大开度下运行,以达到运行稳定,节能降耗的目的。

参考文献:

- [1] 吕浩军. 新昌电厂锅炉排烟余热回收及除尘提效改造[D]. 保定: 华北电力大学, 2015: 1-4.

- [2] 杨宁武. 旋笛式声波吹灰器在锅炉折焰角积灰中的应用 [J]. 能源与节能, 2012(12): 107-109.
YANG Ningwu. Application of rotary flute sonic soot blowers in ash deposition of boiler furnace arch [J]. Energy and Energy Conservation, 2012(12): 107-109.
- [3] 刘佳. 声波清灰技术声场数值分析与仿真研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 1-8.
- [4] MIREK P. Field testing of acoustic cleaning system working in G670 MW_{TH} CFB boiler [J]. Chemical and Process Engineering, 2016, 34(2): 283-291.
- [5] NOR S M Y, BANDAR B, YOUSEF A, et al. Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 29(1): 568-576.
- [6] 安连锁, 刘铭媛, 武国红. 声波除灰的管阵列声场数值模拟研究 [J]. 热力发电, 2009, 38(10): 25-28.
AN Liansuo, LIU Mingyuan, WU Guohong. Study on numerical simulation of sound field on tubes array for sonic soot cleaning [J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(10): 25-28.
- [7] 卢布林. 吹灰器在大型火电厂吹灰、除垢、除焦方面的应用研究 [J]. 华电技术, 2013, 35(8): 15-18.
LU Bulin. Application of sootblower in soot-blowing, descaling and decoking in large thermal power plants [J]. Huadian Technology, 2013, 35(8): 15-18.
- [8] 陈一平, 于鹏峰, 邹自敏, 等. 火电厂锅炉折焰角斜坡积灰原因及对策 [J]. 中国电力, 2011, 44(2): 46-48.
CHEN Yiping, YU Pengfeng, ZHOU Zimin, et al. Study on ash fouling of boiler furnace arch and its countermeasures in coal fired power plant [J]. Electric Power, 2011, 44(2): 46-48.
- [9] 滕百慧. 简述声波清灰的原理及发展前景 [J]. 科技创新与应用, 2016(13): 68.
TENG Baihui. The principle and development prospect of acoustic cleaning [J]. Technology Innovation and Application, 2016(13): 68.
- [10] 曾荣, 余长开, 冯继勇. 600 MW 燃煤炉省煤器声波清灰改造 [J]. 电站系统工程, 2010, 26(2): 39-40.
ZENG Rong, YU Changkai, FENG Jiyong. Retrofit of acoustic ash-cleaning in 600 MW unit power plant's economizers [J]. Power System Engineering, 2010, 26(2): 39-40.
- [11] 卓敏鹏, 王鹏. 一种悬臂结构高强蒸汽声频清灰装置: ZL201620486880.2 [P]. 2016-10-19.
- [12] 于静梅, 孟凡丹, 刘盼盼, 等. 600 MW 汽轮机组高压联合进汽阀变工况内部流场的特性分析 [J]. 动力工程学报, 2014, 34(11): 862-866.
YU Jingmei, MENG Fandan, LIU Panpan et al. Analysis on off-design flow field in high-pressure combined valve of a 600 MW steam turbine [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(11): 862-866.
- [13] 曾立飞, 刘观伟, 毛靖儒, 等. 调节阀振动对阀内流场影响的数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1977-1982.
ZENG Lifei, LIU Guanwei, MAO Jingru et al. Numerical simulation for the effect of the control valve vibration on the flow field [J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(8): 1977-1982.

[本刊相关文献链接]

- 王宏朝, 单希壮, 杨志刚. 利用矩阵风扇的发动机舱流场优化. 2017, 51(3): 14-19. [doi:10.7652/xjtuxb201703003]
- 陈立, 李祥晟. 低旋流 CH₄/H₂ 火焰的燃烧特性及稳定性机制研究. 2017, 51(1): 72-78. [doi:10.7652/xjtuxb201701012]
- 王红娟, 屠珊, 杜洋, 等. 联合进汽阀内部流场三维数值模拟及阀碟受力分析. 2016, 50(12): 148-154. [doi:10.7652/xjtuxb201612023]
- 兰艾青, 王志恒, 于洪石, 等. 合成射流激励位置对控制翼型大攻角分离流动影响的数值研究. 2016, 50(7): 110-117. [doi:10.7652/xjtuxb201607017]
- 马源, 曹文瑾, 林梅. 矩形截面螺旋通道内的二次流场特性. 2014, 48(8): 122-127. [doi:10.7652/xjtuxb201408021]
- 卫之龙, 王金华, 舒新建, 等. 合成气预混层流火焰结构的实验和数值研究. 2014, 48(7): 34-40. [doi:10.7652/xjtuxb201407007]
- 苏波, 韩向科. 用于三维非均质流场计算的改进流线迎风 Petrov-Galerkin (SUPG) 方法. 2014, 48(3): 128-134. [doi:10.7652/xjtuxb201403023]
- 卢娟, 张朝磊, 丰镇平. 离散伴随气动优化设计方法的紊流扩展. 2013, 47(1): 37-42. [doi:10.7652/xjtuxb201301008]
- 唐文勇, 陈清华, 陈子云, 等. 送粉气流对冷喷涂流场及粒子速度影响的数值模拟. 2012, 46(7): 82-86. [doi:10.7652/xjtuxb201207015]

(编辑 杜秀杰)