

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.012

低热值高炉煤气燃气轮机零值班技术

谢英华¹, 唐 令²

(1. 杭州汽轮机股份有限公司, 浙江 杭州 310022; 2. 重庆中节能三峰能源有限公司, 重庆 401220)

摘要: 燃用低热值高炉煤气燃气轮机通常采用焦炉煤气作为值班燃料,但由于值班燃料净化工艺限制和压缩系统不稳定易造成燃机运行故障。为解决由此引起的燃机运行瓶颈,将零值班技术应用到燃机运行中,即在满足一定条件下,采用值班高炉煤气替代值班焦炉煤气而减少焦炉煤气实际使用量。分析了燃机零值班技术的基本原理、管路系统改造、燃料热值应用范围、零值班与值班模式的切换条件、新增连锁保护、零值班模式控制流程、增加的经济效益等,并通过零值班试运行的试验数据验证了零值班技术的可行性。研究表明,由于焦炉煤气燃料问题引起的燃机故障率可通过零值班技术升级而大大降低,同时该项技术可为企业节约成本2 000万元/年台。

关键词: 燃气轮机; 高炉煤气; 焦炉煤气; 零值班技术

中图分类号: TH113.2; TP242.2 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)08-1017-05

Zero pilot fuel gas technology for BFG gas turbine

XIE Ying-hua¹, TANG Ling²

(1. Hangzhou Steam Turbine Co., Ltd., Hangzhou 310022, China;

2. CECIC & SANFENG Energy Corporation, Chongqing 414100, China)

Abstract: Coke oven gas (COG) is usually used as pilot fuel gas for blast furnace gas (BFG) gas turbine. However, because of the limitation of COG purification process and instability of compression system, turbine easily break down, pilot COG fuel gas became a bottleneck for BFG GT good operation. In order to solve this problem, zero pilot fuel gas technology was applied to GT operation. That means, during GT operation, pilot COG was replaced by pilot BFG under certain conditions. The theory basis, new piping system, fuel calorie application range, operation condition, interlock protection, technological process and economic benefits to zero pilot fuel gas technology were analysed, and the test operation data of zero pilot fuel gas technology verified its feasibility. The experimental results indicate that zero pilot fuel gas technology for BFG gas turbine could reduce the GT fault rate because of pilot COG, and it could saving the lost of twenty million Yuan per year to the Gas Turbine user.

Key words: gas turbine; blast furnace gas(BFG); coke oven gas(COG); zero pilot fuel gas technology

0 引 言

根据国家十二五规划及钢铁行业发展趋势,钢铁企业只有大力发展余热回收和节能减排技术才能深挖潜力,而燃用低热值高炉煤气的燃气—蒸汽联合循环发电技术(CCPP)高效稳定,恰恰适应了当前钢铁用户的需求而得到应用推广。高炉煤气CCPP循环热效率根据机型不同可达到38%~46%^[1],大型燃用天然气

的CCPP循环热效率可达60%^[2],同时CCPP比较常规锅炉机组的NO_x排放量降低了40%,粉尘排放降低了50%,节能环保效果显著。低热值高炉煤气燃气轮机与燃用天然气燃气轮机相比较,前者由于燃用的高炉煤气(BFG)清洁度低、易燃性差,其辅机系统会相对复杂,因此发电系统设备投资、维护费用高,并对高炉煤气清洁度如含尘量及微量成分等控制要求较高^[3]。特别是低热值高炉煤气燃气轮机通常采用焦炉煤气(COG)作为点火燃料,而由于BFG燃烧稳定性问题,

收稿日期: 2014-04-04

作者简介: 谢英华(1977-),女,辽宁铁岭人,主要从事燃气轮机销售及国产化等方面的研究. E-mail: xieyh@htc.cn

在燃机运行过程中也通常采用COG作为稳燃的值班燃料,这样当COG中的焦油、苯、萘等微量成分达不到限制要求时,易导致燃气轮机设备故障,影响CCPP发电厂的稳定、安全、经济运行^[4]。

本研究以M251s型燃机为例,介绍低热值高炉煤气燃气轮机的零值班技术,其从根本上解决值班焦炉煤气引起设备故障的问题,保证系统稳定和高效运行。

1 燃机零值班技术改造前的问题分析

对于低热值高炉煤气燃气轮机来说,由于高炉煤气燃烧稳定性等问题,通常技术人员采用焦炉煤气作为值班燃料,在燃机正常运行过程中起到长明灯的作用。这样焦炉煤气的质量及其压缩系统的稳定性对燃机电厂的正常运行非常重要。

对于焦炉煤气,钢铁企业传统的净化工艺为:粗煤气→初冷→捕焦油→煤气输送→预冷→初脱萘→脱硫→饱和器法脱氨→终冷洗萘→脱苯→净煤气。但净化后煤气中的硫、苯、焦油、萘等杂质含量仍较高,因此,CCPP发电厂通常在焦炉煤气压缩机入口增设了焦炉煤气精处理系统。但如果焦炉煤气使用流量过大,受焦炉煤气精处理系统再生速度的限制,燃机系统仍易造成阀门结焦卡涩、喷嘴堵塞、燃机冷却孔堵塞及SO_x增大而引起的下游锅炉腐蚀等问题。同时,焦炉煤气压缩系统的稳定性要求也必须提高,这就导致系统配置冗余,投资增加。根据钢铁企业燃机电厂运行数据统计分析,由于焦炉煤气问题引起的跳机比率达33%。

由此可见,焦炉煤气已成为了燃气轮机在钢铁企业应用的瓶颈。焦炉煤气问题的解决思路可以有二个方向,其一是采用煤气处理新工艺,进一步提高煤气净化效果,但缺点是增加用户的投资和维护成本;另一个是进行燃机技术升级,即在燃机正常运行过程中不使用焦炉煤气,采用零值班技术,彻底摆脱煤气质量的困扰。

2 燃机零值班技术的理论基础

2.1 零值班系统原理

M251s燃机零值班技术是在燃机并网带负荷后使用压缩的高炉煤气代替值班焦炉煤气,从而降低焦炉煤气的使用量,以减少焦炉煤气可能带来的机组故障。但由于高炉煤气燃烧特性,在燃机点火和升速过程中,以及煤气热值显著下降时,仍需要投入值班焦炉煤气。COG零值班系统原理图如图1所示,其显示了燃机转速、燃机负荷与值班COG流量的关系。在燃机

启动、点火至并网期间,焦炉煤气仍需作为点火和稳燃的值班燃料,流量约1 700 Nm³/h;燃机并网后,在值班模式下,燃机满负荷运行需要的值班焦炉煤气流量约900 Nm³/h,而燃机负荷增减调整的过程为了避免熄火,需要的值班焦炉煤气流量约900 Nm³/h~1 700 Nm³/h。根据试验及实际运行情况,在燃机并网后,可以在满足一定条件下采用零值班模式,即值班COG流量为零,但需由值班COG切换为压缩的BFG以预防值班管路回火。在零值班运行模式下,为保证燃烧稳定,需通过调整燃烧室旁通阀开度,以调整合适的过量空气系数,使燃烧室压力波动监测(combustion pressure fluctuation monitor, CPFM)的波动在允许范围内,并且通过控制透平入口温度T3,降低氮、硫氧化物的排放,同时根据热值、气温、负荷高低极限,增加相应的切换、报警、跳闸连锁逻辑。

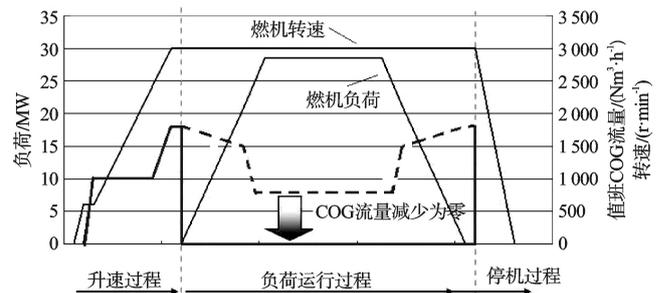


图1 COG零值班系统原理图

2.2 应用零值班技术的燃料热值范围

经过试验证明^[5],在满足一定条件下,在热值为2 990 kJ/Nm³-wet~3 770 kJ/Nm³-wet的范围内,燃机可以在0%~100%负荷下运行而不使用值班焦炉煤气;但是当热值范围低于2 990 kJ/Nm³-wet时,必须投入COG作为值班燃料,否则有失火的跳机风险。零值班技术燃料热值范围如图2所示。

国内某钢厂燃机调试期间COG零值班模式下的运行数据如表1所示,其随着负荷增加而增加,但如果超过报警值则说明BFG滤网堵塞,燃机将自动切换为COG值班模式运行。上述试验数据表明,燃机可以在0~100%负荷期间以及高热值3 770 kJ/Nm³-wet附近采用COG零值班运行模式。

2.3 应用零值班的燃机性能提升

根据NO_x生成原理,燃烧场温度越高,燃烧速度越快,NO_x生成量越大^[6],通过降低燃烧室温度即透平入口温度T3,抑制NO_x生成。M251s型燃机零值班技术由于取消了高热值的焦炉煤气(平均热值17 000 kJ/Nm³-wet,流量1 000 Nm³/h),从煤气压缩机出口取一路高炉煤气替代焦炉煤气(平均热值800 kJ/Nm³-wet,流量2 800 Nm³/h),减慢了火焰速

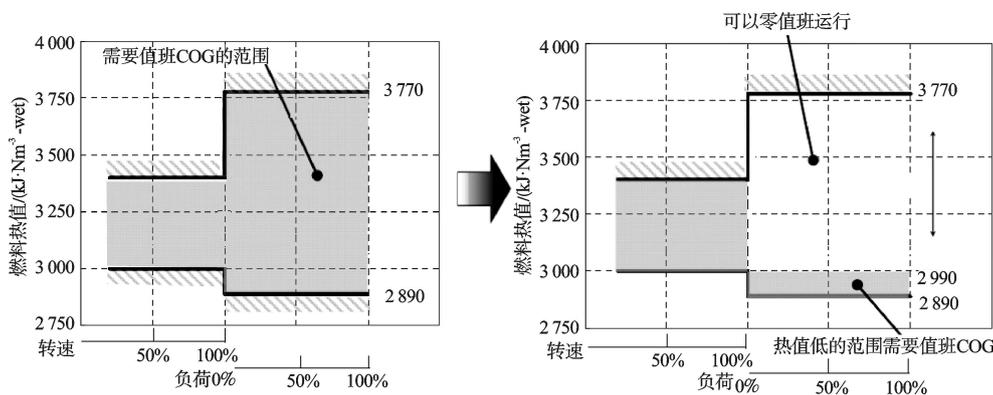


图2 零值班技术应用的燃料热值区域

表1 燃机COG零值班模式运行试验数据

燃机负荷试验	0%试验	5%试验	25%试验	50%试验	75%试验	100%试验	高热值试验
燃机发电机转速/(r·min ⁻¹)	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
燃机发电机净输出功率/MW	0.0	1.5	7.5	15.0	22.5	30.0	27.3
燃料流量域/Nm ³	71 100	75 000	90 150	106 000	126 000	144 362	124 000
燃料热值/(kJ/Nm ³ -wet)	3 200	3 195	3 175	3 257	3 194	3 310	3 656
值班COG流量/Nm ³	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
值班COG流量控制阀开度(-5.0为关闭状态)	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0
喷吹值班BFG管道滤网压差/kPa	1.6	1.0	2.3	3.0	3.9	4.8	3.7

度^[7],使得燃气轮机T3(透平入口温度)下降,大幅降低了NO_x排放,火焰燃烧情况示意图如图3所示。同时,T3温度降低,在采用排气温度控制燃机运行时,可增加更多燃料,以增加燃机的质量流量,从而提高燃气轮机出力0.5 MW以上,联合循环发电量增加1.8%。

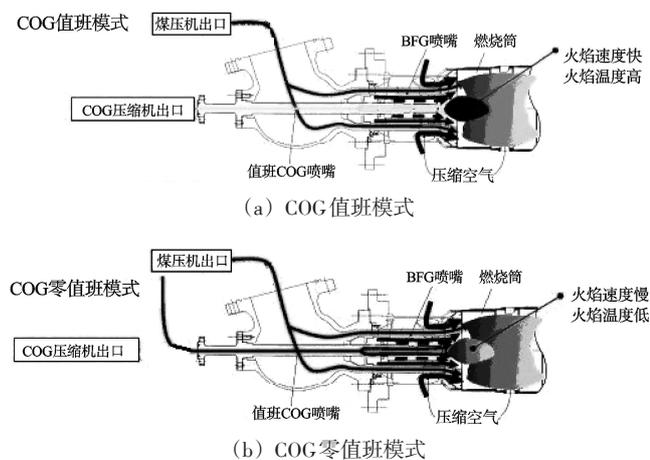


图3 火焰燃烧情况示意图

3 零值班运行条件及工艺流程

3.1 零值班管路系统改造

零值班管路系统如图4所示,比较原系统增加了部分管路和控制阀门。新增了:

(1) 用于在切换零值班运行时隔断BFG与值班COG的高压N₂密封管线,包括N₂密封阀和BFG喷吹隔

断阀;

(2) 值班BFG喷吹管线,即为防止回火,在切断值班COG燃料前,导入一路压缩BFG进入值班喷嘴参与燃烧,包括BFG喷吹供给阀和滤网等;

(3) 值班BFG喷吹管道的低压N₂吹扫管线,包括N₂吹扫阀,主要用于燃机起机前对BFG喷吹供给阀和BFG喷吹隔断阀之间的管线使用N₂进行吹扫,以免切换零值班模式时,该段管路中残留的空气与BFG混合而导致爆燃。

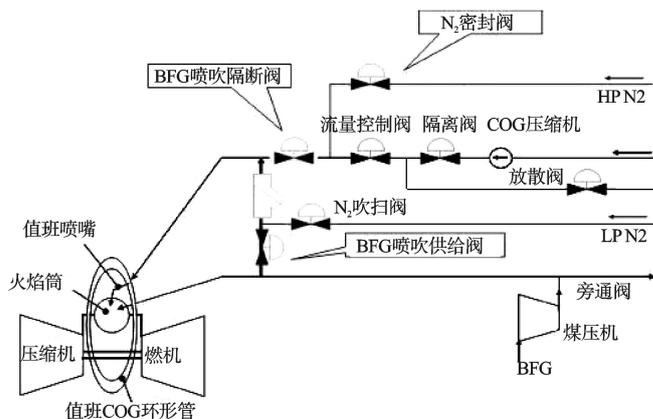


图4 零值班管路系统图

3.2 零值班切换条件

(1) 从COG值班运行切换到COG零值班运行,需要具备以下全部条件:

① 大气温度在≥-12℃(环境温度过低燃烧不

稳定,波动非常剧烈);

- ② 燃气热值 $\geq 3\ 090\ \text{kJ}/\text{Nm}^3\text{-wet}$;
- ③ 燃机负荷 $\geq 5\ \text{MW}$ 。

(2)为了保护燃机,只要以下任一条件成立,控制系统会自动从COG零值班运行切换到COG值班运行,当然成功切换的前提是COG压缩机运行并且压力大于跳机值:

- ① 大气温度 $\leq -12\ ^\circ\text{C}$;
- ② 燃气热值 $\leq 2\ 990\ \text{kJ}/\text{Nm}^3\text{-wet}$;
- ③ 吹扫BFG滤网差压高报警。

3.3 增加的连锁保护

在COG零值班模式下运行,为了保护设备安全,M251s燃机追加了以下连锁保护:

(1)在燃料煤气热值低至下限 $2\ 990\ \text{kJ}/\text{Nm}^3\text{-wet}$,为了避免燃烧不稳定,需投入值班COG。

(2)为防止BFG中杂质堵塞喷嘴,设置了滤网,当该滤网压差高报警时,自动投入值班COG。

(3)值班喷嘴压差低,自动投入值班COG,以保护喷嘴没有流量而引起的喷嘴损伤。

(4)当新增的吹扫BFG阀门异常,失去BFG流量,则自动投入值班COG,以保护喷嘴没有流量而引起的喷嘴损伤。

(5)大气温度 $\leq -12\ ^\circ\text{C}$,可能导致燃烧不稳定,自动投入值班COG。

3.4 燃机零值班模式切换的控制流程

COG值班与COG零值班两种运行模式切换可以使用手动或自动方式,切换过程依靠以下阀门控制完成:

(1)COG值班模式 \rightarrow COG零值班模式切换的阀门控制。

COG值班模式下阀门初始状态为:值班COG流量控制阀开,值班COG隔离阀开,值班COG放散阀关,BFG喷吹供给阀关,BFG喷吹隔断阀开, N_2 密封阀关。

当燃机满足COG零值班运行条件时,在给出切换至COG零值班模式的指令后,首先BFG喷吹供给阀打开;值班COG流量控制阀逐渐闭合,由于COG流量减小,BFG逐渐取代COG进入值班喷嘴,值班COG流量控制阀在4 s后关闭,此时BFG喷吹隔断阀和COG流量控制阀之间已充满BFG;在值班COG流量控制阀闭合时,同时关闭值班COG隔离阀和BFG喷吹隔断阀,并打开值班COG放散阀和 N_2 密封阀;这时,BFG已完全取代COG进入值班喷嘴参与燃烧;在值班COG放散阀和 N_2 密封阀打开时,值班COG流量控制阀逐渐打开,持续3 s,在高压 N_2 吹扫残留COG后,值班COG流量控制阀关闭,完成COG值班模式至COG零值班模式

的切换。阀门控制如图5所示。

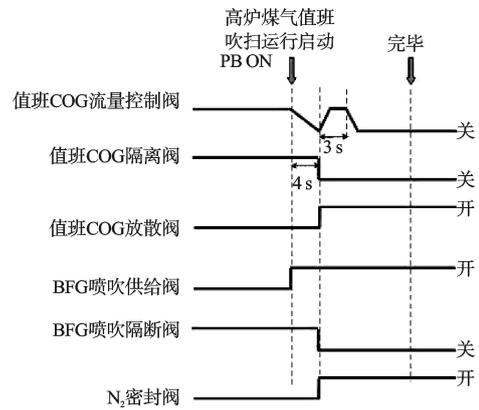


图5 COG值班模式 \rightarrow COG零值班模式的阀门控制

(2)COG零值班模式 \rightarrow COG值班模式切换的阀门控制。

COG零值班模式下阀门初始状态为:值班COG流量控制阀关,值班COG隔离阀关,值班COG放散阀开,BFG喷吹供给阀开,BFG喷吹隔断阀关, N_2 密封阀开。

当燃机不满足COG零值班运行条件时,在给出切换至COG值班模式的指令后,首先 N_2 密封阀关闭,值班COG流量控制阀打开3 s,在排放残留 N_2 后关闭;此后,值班COG隔离阀打开,值班COG放散阀关闭,值班COG流量控制阀逐渐打开,值班COG隔离阀和BFG喷吹隔断阀之间已经充满COG;在值班COG隔离阀打开1 s后,BFG喷吹隔断阀打开,由于COG压力比BFG压力高,COG进入值班喷嘴参与燃烧;在BFG喷吹隔断阀打开3 s后,BFG喷吹供给阀关闭,完成COG零值班模式至COG值班模式的切换,阀门控制如图6所示。

4 燃机零值班技术的经济效益

(1)随着零值班技术的应用,COG系统稳定性要求也随之降低,COG压缩机的选型可考虑活塞式,大大降低了采购成本。同时COG压缩机可根据机组运行情况减负荷或停机,每年COG压缩机节约厂用电约 $6 \times 10^6\ \text{kWh}$ 。

(2)采用零值班技术,按年运行8 000 h,每小时减少COG流量约 $900\ \text{Nm}^3$,增加BFG的流量约 $2\ 800\ \text{Nm}^3$,COG成本 $1.0\ \text{元}/\text{Nm}^3$,BFG成本 $0.1\ \text{元}/\text{Nm}^3$,每年可降低燃料成本 $\geq 900\ \text{Nm}^3/\text{h} \times 8\ 000\ \text{h}/\text{年} \times 1.0\ \text{元}/\text{Nm}^3 - 2\ 800\ \text{Nm}^3/\text{h} \times 8\ 000\ \text{h}/\text{年} \times 0.1\ \text{元}/\text{Nm}^3 \approx 500\ \text{万元}^{[8]}$ 。

(3)对于很多钢铁企业来说,高炉煤气热值偏高,采用零值班技术,由于热值提高 $100\ \text{kJ}/\text{Nm}^3$ 运行对发电几乎没有影响,按年运行8 000 h,每小时可少用 $2\ 000\ \text{Nm}^3/\text{h}$ 左右的 N_2 ,低压 N_2 的价格按 $0.28\ \text{元}/\text{Nm}^3$ 计算,每年可节约 N_2 成本 $\geq 2\ 000\ \text{Nm}^3/\text{h} \times 8\ 000\ \text{h}/\text{年} \times$

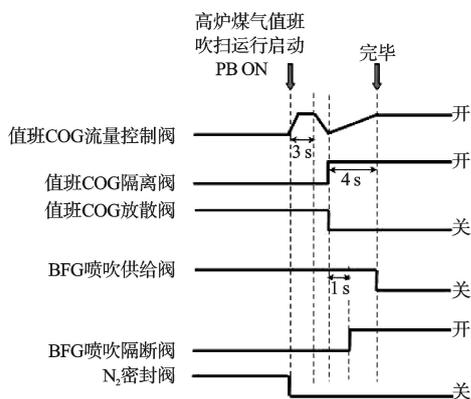


图6 COG零值班模式→COG值班模式 阀门控制

0.28 元/Nm³=448 万元。

(4) 由于燃烧温度降低,可增加更多燃料,提高燃气轮机出力 0.5 MW 以上,每年增加发电收益≥0.5 元/kWh×8 000 h/年×500 kW≈200 万元。

(5) 降低除焦油装置的维护成本,同时减少非计划停机,使年利用小时数超过 8 000 h,减少经济损失约 1 000 万元/年。

5 结束语

本研究对低热值高炉煤气燃气轮机的值班焦炉煤气产生问题进行了分析,并对零值班技术升级的理论基础、切换条件、连锁保护、控制流程、经济效益进

行了研究。研究表明,由于焦炉煤气燃料问题引起燃机故障率可通过零值班技术升级而大大降低。该项技术已在沙钢、涟钢、邯钢、重钢、迁钢和太钢的CCPP电厂推广应用,实际运行情况表明,单台燃机的零值班技术升级可为企业节约成本 2 000 万元/年,同时,烟气排放的环保指标进一步提升。

参考文献(References):

- [1] 林张新. 小型燃气轮机在中国企业应用研究[D]. 杭州:浙江大学能源工程学系,2006.
- [2] 陈慧聪. 西门子GUD 1 S·V94·3A 燃气-蒸汽联合循环发电机组的应用与优化[J]. 机电工程,2011,28(6):757-761.
- [3] 谢英华,严敬和. 小型燃气轮机在钢厂的应用[J]. 热力透平,2006,35(1):51-54.
- [4] 陈川. 富余高炉煤气联合循环发电在马钢的应用[J]. 燃气轮机技术,2007,20(4):6-10.
- [5] 周小力,杨锐. M251S 型燃气轮机零值班燃料试验及研究[J]. 燃气轮机技术,2011,24(2):65-69.
- [6] 赵林凤,陈又申,朱基木. 150MW 高炉煤气燃气-蒸汽轮机联合循环发电技术优化与实践[J]. 宝钢技术,2008(2):11-15.
- [7] 战建军. M251s 型高炉煤气燃机零值班探析[J]. 浙江冶金,2013(4):52-54.
- [8] 宋思远,杨锐. M251S 型燃气轮机工程计算及经济性分析[J]. 机电工程,2009,26(8):9-12.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

谢英华,唐令. 低热值高炉煤气燃气轮机零值班技术[J]. 机电工程,2014,31(8):1017-1021.

XIE Ying-hua, TANG Ling. Zero pilot fuel gas technology for BFG gas turbine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(8): 1017-1021.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 978 页)

参考文献(References):

- [1] 王凯,刘厚林,袁寿其,等. 离心泵多工况水力设计方法[J]. 华中科技大学学报,2012,40(5):15-19.
- [2] 袁寿其,胡博,陆伟刚,等. 中比转速离心泵多工况设计[J]. 排灌机械学报,2012,30(5):497-502.
- [3] 汤跃,秦武轩,袁寿其. 基于变工况运行的泵能耗指标计算方法[J]. 农业工程学报,2009,25(3):46-49.
- [4] 何有世,袁寿其,郭晓梅,等. 分流叶片离心泵叶轮内变工况三维数值分析[J]. 江苏大学学报,2005,26(3):193-197.
- [5] 吴贤芳,刘厚林,王凯,等. 全工况下双流道泵内流三维PIV测量[J]. 排灌机械学报,2012,30(6):665-669.
- [6] 郭翔,邵春雷,朱瑞松,等. 离心泵内部定常流动的数值模拟[J]. 煤矿机械,2010,31(1):50-52.
- [7] 李龙,王泽,徐峰,等. 离心泵叶轮内变工况三维湍流数值模拟[J]. 农业机械学报,2004,35(6):72-89.
- [8] 代翠,董亮,刘厚林,等. 离心泵叶轮全流道非定常数值计算及粒子图像测速试验[J]. 农业工程学报,2013,29(2):66-72.
- [9] 张学静,杨军虎. 小流量工况下离心泵的性能预测研究[J]. 节水灌溉,2011(5):17-19.
- [10] 林玲,牟介刚,郑水华,等. 平衡鼓间隙对离心泵轴向力平衡的影响[J]. 轻工机械,2013,31(6):13-15.
- [11] 郭鹏程,罗兴绮,刘胜柱. 离心泵内叶轮与蜗壳间耦合流动的三维紊流数值模拟[J]. 农业工程学报,2005,21(8):1-5.
- [12] SPEZIALE C G, HANGAM S. Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows[J]. Engineering Science, 1992(10): 1379-1388.

[编辑:程浩]