

耦合跨临界有机朗肯循环和蒸气压缩制冷循环分析

莫东鸣¹ 胡雷鸣² 朱小英³

(1. 重庆工业职业技术学院 机械工程学院, 重庆 401120; 2. 国网重庆电力公司, 重庆 400015;
3. 深圳能源集团光明燃机电厂筹建办, 广东 深圳 518031)

摘要: 通过 TORC(耦合跨临界有机朗肯循环)和 VCR(蒸气压缩制冷循环)构建了一种由低温烟气驱动的冷电联产复合系统(T-O-V)。采用 R22、R134a、R227ea 和 R290 作为循环工质,在不同冷量需求工况下,该复合系统可以有效地将低温烟气余热转化为电能和冷量输出。对 T-O-V 系统的热力学性能分析表明:在一定热源条件下,随着膨胀机进口压力的升高,系统总制冷系数先增大后减小,存在极大值,反映复合系统经济性的单位净输出功对应的换热面积存在最小值;采用 R22 作为循环工质时系统单位净输出功对应的换热面积最小。

关键词: 跨临界有机朗肯循环; 蒸气压缩制冷循环; 烟气余热; 复合系统

中图分类号: TK123 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.008

引言

为有效利用中低温余热,提高能源利用率以及减少工业污染气体排放,国内外学者对中低温余热利用技术进行了多方面探索^[1-3]。以低沸点有机物作为循环工质的 ORC(有机朗肯循环)可以有效回收温度低于 300 °C 的余热,是一种具有发展前景的低温余热发电技术。TORC 跨临界有机朗肯循环避免了有机工质在余热回收换热器内的等温相变过程,在理论上可以形成一个类三角循环,从而更好地实现循环工质与热源的良好温度匹配,成为提高余热利用率的重要方式^[4-6]。吸收式发电制冷循环和喷射式发电制冷循环是将制冷循环和 ORC 技术结合到一起实现冷电联产的两种复合循环形式。利用低品位余热驱动制冷系统已成为回收低品位余热实现冷电联产的有效方式^[7-10]。

针对国内工业锅炉产生的大量低温烟气余热未能得到有效利用以及厂区通过蒸气压缩制冷循环(VCR)消耗大量电能制取冷量的现状,本研究通过

耦合跨临界有机朗肯循环和蒸气压缩制冷循环,提出了一种由低温烟气余热驱动的新型冷电联产复合系统(T-O-V)。该复合系统实现 2 个子循环的工质共用和同步冷凝,且在不同的冷量需求条件下可以灵活调节制冷量与发电量之间的份额分配。在系统性能分析的基础上,对超临界压力和循环工质进行初步优化,为该类系统的工质筛选提供参考。

1 T-O-V 系统工作原理

构建的 T-O-V 复合系统如图 1 所示。该复合系统通过联轴器将有机朗肯循环系统的膨胀机、发电机与蒸气压缩制冷循环的压缩机同轴串联,实现 2 个子系统有效耦合;采用同一种有机工质,由膨胀机和压缩机排出的蒸汽在同一冷凝器内冷凝;采用跨临界有机朗肯循环吸收低温烟气余热,提高余热回收率。

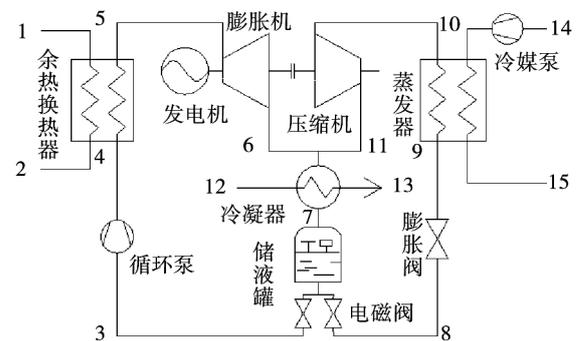


图 1 T-O-V 复合系统原理图

Fig. 1 The principle diagram of the T-O-V combined system

低沸点有机工质在 2 个子系统内的基本过程为:在 TORC 系统中,从储液罐出来的饱和液态有机

收稿日期: 2015-01-13; 修订日期: 2015-03-25
基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2011CB710701)
作者简介: 莫东鸣(1982-),女,重庆人,重庆工业职业技术学院讲师。

工质经工质泵升压后进入余热换热器, 吸收烟气热量至超临界状态后进入膨胀机做功, 带动发电机和压缩机工作。乏汽通过冷凝器被冷凝为液态, 进入储液罐开始下一个循环。在 VCR 系统中, 有机工质从储液罐流经分配阀后经膨胀阀降压进入蒸发器, 工质吸收载冷剂热量后变成饱和蒸汽, 由压缩机压缩进入冷凝器与来自 TORC 的蒸汽共同冷凝。

2 T-O-V 系统分析

2.1 热力学分析

在余热驱动的 T-O-V 复合系统中, 热源由工业锅炉实际排烟条件决定, 复合系统主要参数如表 1 所示。

表 1 复合系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of the combined system

参 数	数 值
烟气入口温度 $T_1 / ^\circ\text{C}$	200
烟气出口温度 $T_2 / ^\circ\text{C}$	100
烟气流量 $m_g / \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	1
烟气比热容 $c_{p,g} / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	1.085
冷却空气入口温度 $T_{12} / ^\circ\text{C}$	25
冷凝器节点温差 $\Delta T_p / ^\circ\text{C}$	5
冷却空气比热容 $c_{p,a} / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	1.004 5
膨胀机入口温度 $T_3 / ^\circ\text{C}$	180
VCR 蒸发温度 $T_e / ^\circ\text{C}$	5
膨胀机等熵效率 $\eta_i / \%$	80
工质泵等熵效率 $\eta_p / \%$	85
压缩机等熵效率 $\eta_c / \%$	90

为简化模型, 换热器散热损失、储液罐的静压、换热器以及管路压降均忽略不计。复合系统温熵图如图 2 所示, 在稳定工况下, 认为有机工质在冷凝器和蒸发器出口分别为饱和液态和饱和气态。

系统制冷量 Q_e 即有机工质在蒸发器中的吸热量:

$$Q_e = m_{wfe} (h_{10} - h_9) \quad (1)$$

有机工质在余热换热器内的换热量 Q_b 来源于烟气的放热量:

$$Q_b = m_{wft} (h_5 - h_4) = m_g c_{p,g} (T_1 - T_2) \quad (2)$$

式中: m_{wft} 、 m_{wfe} —TORC 和 VCR 子系统循环工质质量流量; h —工质比焓; m_g —烟气质量流量; $c_{p,g}$ —工质定压比热容; T —烟气温度。

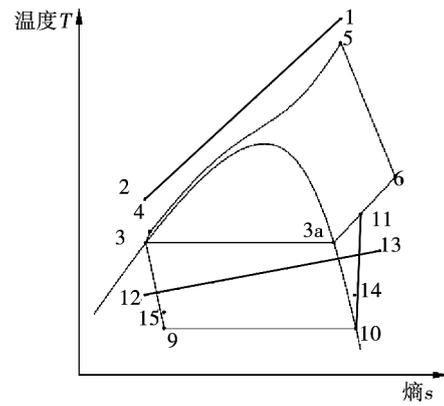


图 2 T-O-V 复合系统 T-s 图

Fig. 2 The T-s diagram of the T-O-V combined system

复合系统在满负荷制冷工况下, 即所有膨胀机输出功全部用于制冷时系统整体制冷系数 COP_t 为:

$$COP_t = Q_e / Q_b \quad (3)$$

TORC 净输出功 W_{TORC} 以及 VCR 的压缩机功耗 W_c 分别为:

$$W_{TORC} = W_{tur} - W_p \quad (4)$$

$$W_c = m_{wfc} (h_{11} - h_{10}) \quad (5)$$

其中, 膨胀机作功量 W_{tur} 和循环泵功耗 W_p 分别为:

$$W_{tur} = m_{wft} (h_5 - h_6) \quad (6)$$

$$W_p = m_{wft} (h_4 - h_3) \quad (7)$$

2.2 经济性分析

在低温余热回收系统中, 换热器总面积是评价系统总费用的重要参数^[11-12]。为评价耦合系统经济性, 选取单位净输出功换热面积 (ε) 作为目标函数, 研究超临界压力对 ε 的影响。由于余热换热器、冷凝器和蒸发器承压存在较大差异, 以蒸发器压力为基准, 通过换热器工质侧压力对换热面积进行修正^[13], 即

$$A_t = x_b A_b + x_c A_c + A_e \quad (8)$$

$$\varepsilon = A_t / W_{TORC} \quad (9)$$

式中: A_b 、 A_c 、 A_e —余热换热器、冷凝器和蒸发器面积; 系数 x_b 、 x_c —压力的函数。

同时, 为防止出现不符合实际传热过程的过小节温差, 在余热换热器内采用等温分段迭代计算方法。将吸热器内的换热过程分为 N (这里取 $N = 100$) 段, 对温度进行离散, 利用每一段的能量守恒来依次迭代计算出每一段内的低温烟气与有机工质间温差, 以保证计算的可靠性和精度。

在给定蒸发温度的条件下, TORC 超临界压力

对整体系统性能有较大影响,不仅直接关系到有机工质在余热换热器内的吸热能力和膨胀机输出功,而且对压缩机功耗、制冷量等都有影响。因此,针对 R22、R134a、R227ea 和 R290 等 4 种有机工质,分析

超临界压力对系统总制冷系数、制冷量以及单位净输出功换热面积的影响。循环工质主要参数如表 2 所示。

表 2 工质主要参数

Tab.2 Main parameters of the working fluids

工质	摩尔质量/ $g \cdot mol^{-1}$	沸点/ $^{\circ}C$	临界压力/ MPa	临界温度/ $^{\circ}C$	臭氧损耗潜能值 ODP	温室效应潜能值 GWP
R22	86.47	-40.8	4.99	96.1	0	14 760
R134a	102.03	-26.1	4.06	101.1	0	1 430
R227ea	170.03	-16.4	3.20	102.8	0	9 810
R290	44.10	-42.1	4.25	96.7	0	约 20

3 计算结果及分析

该复合系统以冷量需求作为首要考虑目标,在冷量需求较大的条件下,TOVC 净输出功全部用来带动压缩机制冷,复合系统总制冷系数是评价该工况下系统性能的重要标准,直接体现了在该条件下系统冷量输出。由图 3 可知 4 种有机工质的总制冷系数随膨胀机进口压力 P_5 的升高而升高,在一定的进口压力下达到最大值。

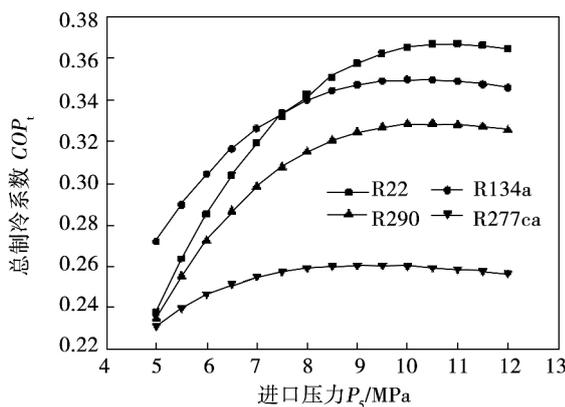


图 3 COP_1 随 P_5 的变化趋势

Fig. 3 Variations of COP_1 with P_5

膨胀机进口压力是影响 T-O-V 系统性能的关键因素,直接关系到余热换热器的换热过程,从而决定了 TORC 子系统内有机工质的流量和在膨胀机内的比焓降,进而影响到蒸汽压缩制冷的工质流量和压缩机功耗。一方面,随着超临界压力的升高,单位工质在工质泵的焓升大于其在膨胀机内的焓降,导致单位工质对外净输出功减小;另一方面,TOVC

子系统有机工质流量增加,使得与制冷量直接相关的压缩机功耗先增大后减小,进而影响复合系统的总制冷系数。

R22 在超临界压力为 11 MPa 时具有最大总制冷系数,这表明 R22 是在该热源条件下可对外输出最大冷量的有机工质。R134a 和 R290 在 10 MPa 附近达到各自最大总制冷系数,分别为 0.35 和 0.33。制冷效果最差的是 R227ea,最大总制冷系数仅为 0.26,远低于以上 3 种有机工质。这主要是由于单位有机工质在膨胀机内焓降较低,同时,蒸汽压缩子循环制冷系数较小。制冷系数最大时对应的冷却空气流量如图 4 所示。

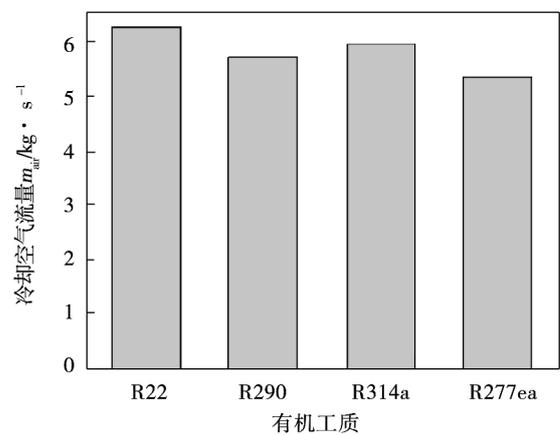


图 4 不同工质对应的冷却空气流量

Fig. 4 Mass flow rates of cooling air with different working fluids

系统净输出功作为对外输出电能和冷量的动力,以单位净输出功换热面积为目标函数对复合系统经济性进行了初步评价。图 5 表明,单位净输出

功换热面积随膨胀机进口压力的升高先减小后增大。这是由于随着膨胀机进口压力的升高,受膨胀机内单位工质焓降和工质流量的影响,系统净输出功率先增大后减小,而在该压力范围内换热器面积不断增大。4 种有机工质均在超临界压力为 8 MPa 附近达到最小值,此时对应系统经济性能最佳。由此可见,不同的评价标准对应的最佳膨胀机进口压力存在一定差异。R22 是最适合用于余热回收制冷的工质,其次分别是 R134a、R290 和 R227ea。图 6 是不同冷量需求工况下,不同工质对应的制冷量变化。冷量需求越大的工况,工质性能的差异越大。

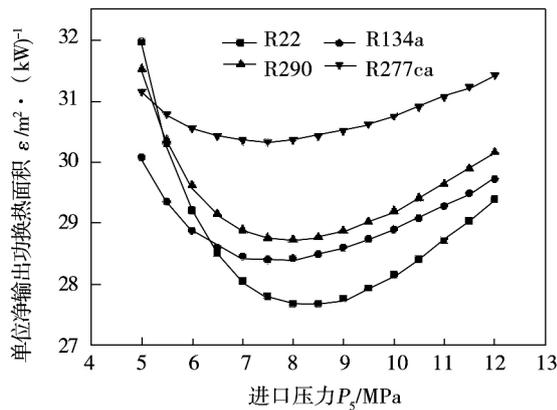


图 5 单位净输出功率换热面积的变化
Fig. 5 Variations of heat transfer area per unit net output power

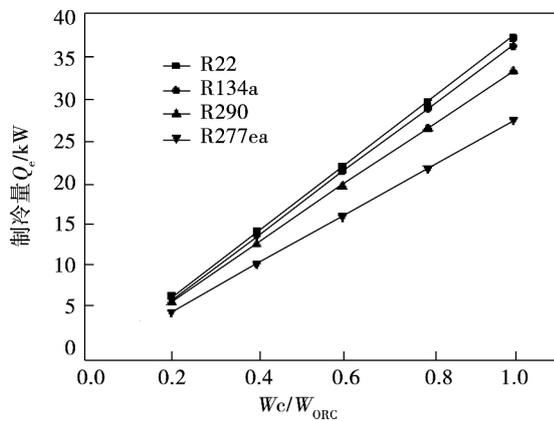


图 6 不同制冷份额工况下的制冷量
Fig. 6 The refrigerating capacity in various refrigeration operating conditions

通过以上分析可知,无论是以系统总制冷系数为标准的热力学评价、还是以单位净输出功率换热面积为标准的评价,在该复合系统中湿工质

R22 优于干工质 R227ea。干工质蒸发潜热较小,相同压降条件下单位工质在膨胀机内的焓降较小。同时,在选取循环工质时不仅要考虑工质的临界压力,而且应该充分考虑压缩制冷系统对工质性能要求。

4 结 论

提出的 T-O-V 复合系统将跨临界有机朗肯循环和蒸气压缩制冷循环进行耦合,可以有效回收低温烟气余热用于发电和制冷,且可实现冷量和发电量的灵活分配。

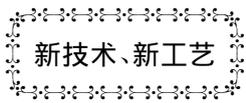
- (1) 在冷量需求最大工况下,复合系统存在最佳膨胀机进口压力使系统总制冷系数达到最大值。
- (2) 复合系统单位净输出功率换热面积随膨胀机进口压力的升高先减小后增大,在 8 MPa 附近达到最小值。
- (3) 通过对选取的 4 种低沸点有机工质进行分析,发现湿工质 R22 具有较大制冷系数,更适用于 T-O-V 复合系统的低温余热回收。

参考文献:

- [1] 顾伟,翁一武,曹广益,等. 低温热能发电的研究现状和发展趋势[J]. 热能动力工程 2007 22(2): 115-119.
GU Wei, WENG Yi-wu, CAO Guang-yi, et al. The Latest Research Findings Concerning Low-temperature Heat Energy-based Power Generation and its Development Trend[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power 2007 22(2): 115-119.
- [2] Wang T Y, Zhang Y J, Peng Z J, et al. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011, 15: 2862-2871.
- [3] Schuster A, Karellas S, Kakaras E, et al. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications[J]. Applied Thermal Engineering 2009 29: 1809-1817.
- [4] Zhang SJ, Wang HX, Guo T. Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation[J]. Applied Energy 2011 88: 2740-2754.
- [5] Goswami D Y. Solar thermal power: status of technologies and opportunities for research[J]. Heat and Mass Transfer Conference, 1995 57-60.
- [6] Oliveira A C, Afonso C, Matos J. A combined heat and power system for buildings driven by solar energy and gas[J]. Applied Thermal Engineering 2002 22: 587-593.
- [7] Wang H L, Richard P, Tom H. Design study of configurations on

- system COP for a combined ORC (organic Rankine cycle) and VCC (vapor compression cycle) [J]. Energy ,2011 ,36: 4809 -4820.
- [8] Adrienne BL ,SrinivasG. Comparative assessment of alternative cycles for waste heat recovery and upgrade [J]. Energy ,2011 ,36: 4492 -4504.
- [9] 黄允东 ,郁永章. 利用涡旋机械的朗肯-朗肯循环制冷系统制冷剂的优选 [J]. 流体机械 ,1997 ,25(1) : 52 -55.
HUANG Yun-dong ,YU Yong-zhang. Refrigerants optimization of Rankin-Refrigeration system using Turbine machinery [J]. Fluid Machinery ,1997 ,25(1) : 52 -55.
- [10] Satha A ,Thanarath S. Analysis of a combined Rankine-vapour-compression refrigeration [J]. Energy Conversion and Management 2010 ,51: 2557 -2564.
- [11] Li Y R ,Wang J N ,Du M T. Influence of coupled pinch point temperature difference and evaporation temperature on performance of organic Rankine cycle [J]. Energy 2012 ,42: 503 -509.
- [12] Madhawa Hettiarachehi H D ,Golubovic M ,Woreka W M ,et al. Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources [J]. Energy 2007 ,32: 1698 -1706.
- [13] Turton R ,Bailie R C ,Whiting W B ,et al. Analysis ,synthesis and design of chemical processes. New Jersey: Prentice Hall PTR; 1998.

(丛 敏 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2015.05.009

韩国追求更高效率和更低排放的联合循环电站

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2014 年 3 月刊报道 ,在韩国首都首尔以南约 120 km 的布戈克 ,由西门子公司和合作者 GS E&C 合作正在进行丹金 3 联合循环电站的交工试运行。

在此以前 ,在同一个场址 ,538 MW 的 2 + 1 (2 台燃气轮机加 1 台汽轮机) 配置的丹金 1 多轴联合循环电站已于 2000 年投入运行。该电站装用 2 台 SGT6 - 4000F 燃气轮机 ,在当时是韩国效率最高的发电站。紧接着 ,使用 Siemens F 级技术的另一个 2 + 1 配置的丹金 2 多轴联合循环电站投入运行 ,该联合循环装置的输出功率为 550 MW ,基于低热值的净效率为 58.6% 。415 MW 的丹金 3 单轴联合循环电站使用了更高效率的西门子公司 H 级燃气轮机 - SGT6 - 8000H (输出功率为 274 MW ,效率为 40.0%) ,以便达到更低的燃料消耗并减少排放。该电站的 NO_x 排放为 15 mg/m³ ,毛(总) 效率高达 61% 。

上述三个电站都是利用液化天然气作为燃料。

韩国已经成为 Siemens Energy 公司关键的市场。Siemens 公司声称 ,已有价值超过 40 亿欧元、装机功率为 4 GW (G = 10⁹) 的工程项目在今后二年投入运行 ,包括在 2014 年 2015 年之间交工试运行的装有 H 级燃气轮机的 4 个联合循环电站。总数为 7 台的高效率 SGT6 - 8000H 燃气轮机正在安装。这一切都表明韩国在电站工程建设中 ,始终追求高效率和优良的环保。

(吉桂明 摘译)

By using the simplified ECAH (Epstein-Carhart-Allegre-Hawley) theoretical model ,a numerical calculation was made and the corresponding relationship among the ultra-sonic attenuation ,steam density and particle diameters was obtained. Based on the ultra-sonic wave acoustic attenuation measurement method ,an ultra-sonic steam particle diameter and concentration measurement and test system with its central frequency being 22 kHz ,40 kHz and 200 kHz respectively was designed and a steam liquid droplet particle diameter and concentration ultra-sonic method-based measurement test was carried out when the temperature was 371.3 K. In the meanwhile ,at the same temperature ,a contrast test was performed of the steam by using the multi-wave length light extinction method. It has been found that the particle diameter and concentration measured by using the ultra-sonic attenuation method approach to those measured by using the light extinction method and the mean Sauter diameter is between 3 and 5 microns. The relative measurement error of the concentration is less than 2% . **Key words:** ultra-sonic ,light extinction method ,particle diameter measurement ,concentration measurement ,gas-liquid two-phase flow

耦合跨临界有机朗肯循环和蒸汽压缩制冷循环分析 = **Analysis of a Trans-critical Organic Rankine Cycle Coupled With a Steam Compression Refrigeration Cycle** [刊 汉] MO Dong-ming (School of Mechanical Engineering ,Chongqing Industrial and Vocational Polytechnic College ,Chongqing ,China ,Post Code: 401120) ,HU Lei-ming (State Power Grid Chongqing Electric Power Company ,Chongqing ,China ,Post Code: 400015) ,ZHU Xiao-ying (Construction Preparation Office ,Guangming Gas Turbine Power Station ,Shenzhen Energy Source Group ,Shenzhen ,China ,Post Code: 518031) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2015 ,30(5) . – 684 – 688

Through coupling a trans-critical organic Rankine cycle (TORC) with a steam compression refrigeration cycle ,a cooling and power cogeneration composite system driven by low temperature flue gases was set up. With R22 ,R134a ,R227ea and R290 serving as the working medium in the cycles ,under various operating conditions with different cooling energy demands ,the above-mentioned composite system can effectively convert the low temperature flue gas waste heat to electric energy and cooling energy output. The analytic results of the thermodynamic performance of the cooling and power cogeneration composite system show that under the condition of a certain heat source ,with a rise of the pressure at the inlet of the expander ,the total refrigeration coefficient of the system will first increase and then decrease ,existing an extremely big value and the heat exchange area corresponding to the unit net output power which reflecting the cost-effectiveness of the composite system existing an extremely small value.

When R22 is used as the working medium for the cycles ,the heat exchange corresponding to the unit net output power will be minimum. **Key words:** trans-critical organic Rankine cycle ,steam compression refrigeration cycle , flue gas waste heat ,composite system

边界热源随时间变化的融化问题的数值模拟 = Numerical Simulation of the Melting Problem of the Boundary Heat Source Changing with Time [刊 ,汉] QU Liang-hui ,XING Lin ,YU Zhi-yun (College of Sciences , Zhongyuan University of Technology ,Zhengzhou ,China ,Post Code: 450007) ,LING Feng (College of Mathematics and Statistics ,Zhaoqing University ,Zhaoqing ,China ,Post Code: 526061) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(5) . -689 -695

According to the idea of the method to fix the time interval and step and through considering the time required when the moving interface presses forwards each time by a fixed distance ,a constant space and step method was established to solve the one-dimensional single-phase melting problems of boundary heat sources changing with time. The movement of the moving interface and the temperature field inside the working medium during the phase change process under the condition of three boundary heat sources were numerically simulated and the features of the phase change under various boundary heat sources were analyzed. A comparison and analysis of the numerical simulation results show that it is feasible to seek solutions to the one-dimensional melting problem of boundary heat sources changing with time by using both fixed space and step method and fixed time and step method and both methods have a relatively high precision. **Key words:** melting ,phase change ,moving interface ,temperature ,numerical simulation

边壁振动对燃气涡轮叶片内部冷却影响的场协同分析 = Field Synergy Analysis of the Influence of the Side Wall Vibration on the Internal Cooling of Blades in a Gas Turbine [刊 ,汉] SHEN Jia-huan ,SONG Ping , WANG Hong-guang (College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30 (5) . -696 -701

By using the dynamic grid technology adopted in the software Fluent ,numerically simulated was the convection-based heat exchange process in a two-dimensional rectangular channel between the cooling air and the wall surfaces