doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.053

# 微尺度催化燃烧表面反应对气相反应的影响\*

邵 霞 潘剑锋 唐爱坤 胡 松 侯智勇 (江苏大学能源与动力工程学院,镇江 212013)

摘要:建立局部催化微通道内部燃烧过程的计算模型,采用氢氧气相反应动力学机理和表面反应机理进行了数值 模拟,分析了不同流速、当量比和通道高度下表面反应对气相反应的影响。结果表明,入口流速越大,表面反应对 催化段下游气相反应的促进作用越明显。表面反应热使上下壁面内侧产生的温差随流速的增大而增大;在当量比 约为1时,表面反应明显促进气相反应,而在氧气大幅过量或者严重不足时,表面反应却明显抑制气相反应。在相 同的质量流量下,减小通道高度对表面反应影响较小,对催化段附近空间反应的抑制作用增强,外壁面温度增加。 关键词:微尺度燃烧 表面反应 催化 数值模拟 中图分类号: TK45 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)12-0391-06

## Effects of Surface Reaction on Gas Phase Reaction in Micro Channel

Shao Xia Pan Jianfeng Tang Aikun Hu Song Hou Zhiyong (School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract**: The calculation models of flow and combustion were established for a segmental catalytic micro channel incorporated with detailed hydrogen-oxygen gas-phase and surface reaction mechanisms. The aim of the study was to realize the effects of surface catalyze reaction on gas-phase reaction at different flow velocities, equivalence ratios and channel heights. The results showed that the surface catalytic reaction strengthened gas phase reaction in the downstream of catalytic segment along with the increase of inlet flow velocity. The heat released from surface reaction resulted in a temperature gap between the inner up and down walls, and this temperature gap was increased with the increase of inlet flow velocity in the domain of the front 2 mm, but it vanished gradually because of the dominant gas-phase reaction in the downstream. Due to the competition of OH radical between two reactions, a fit equivalence ratio about 1 contributed to enhancing the gas phase reaction. On the contrary, surface reaction obviously restrained the gas phase reaction when the fit equivalence ratio was too small or big. It restrained gas reaction in the domain of catalyze surface and increased the outer wall's temperature when keeping a constant mass flow rate and a lower height channel. But it had little influence on surface reaction.

Key words: Micro combustion Surface reaction Catalyst Numerical simulation

引言

近 20 年来,能量密度高、便携性能好的微动力 系统备受瞩目,伴生而来的微尺度流动与燃烧问题 已成为其技术核心。因此,在微小几何尺寸内,稳定 和完全燃烧成为研究的热点<sup>[1-3]</sup>。在众多燃烧技术中,预混催化燃烧具有易燃性、低污染、高可燃极限以及燃烧稳定等优势,已成为解决微尺度燃烧问题的可行途径之一<sup>[4-7]</sup>。在微尺度催化燃烧方面, Benedetto等<sup>[8]</sup>研究了丙烷在间隙为1.2 mm、进口段

收稿日期: 2015-03-18 修回日期: 2015-05-14

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(51376082、51206066)、江苏省自然科学基金资助项目(BK20131253)和江苏省普通高校研究生科研创新计 划资助项目(CXLX11\_0572)

作者简介: 邵霞,博士生,主要从事微尺度燃烧与微动力系统研究, E-mail: hsv@ujs.edu.cn

通讯作者:潘剑锋,教授,博士生导师,主要从事动力机械燃烧过程和燃烧系统研究,E-mail: mike@ ujs.edu.cn

局部催化的微平板通道内的燃烧特性:Chen 等<sup>[9-10]</sup> 对内径为1mm的圆管内氢氧预混气体和矩形微通 道内多组分预混气体的催化燃烧进行了数值模拟, 探讨了燃料、氧气以及自由基对化学反应路径的影 响;Zade 等<sup>[11]</sup>对氢气-空气在微催化燃烧室内燃烧 的均相反应贡献率进行了计算,结果表明:催化反应 放热有助于维持小通道内的气相反应,但是催化面 对自由基的高吸收率一定程度上抑制了均相反应。 伍亨等<sup>[12]</sup>对微型通道内甲烷/空气预混气体在镀 Pt 热表面上的催化燃烧进行了数值模拟,探讨了表面 反应和空间反应之间的影响关系;吴晟等<sup>[13]</sup>对微通 道内甲烷的不同催化着火方式进行了实验研究,提 出降低催化着火温度的方法:徐侃等<sup>[14]</sup>对甲烷空气 预混气体催化燃烧进行了模拟计算,发现催化反应 对火焰面厚度、熄火距离有明显影响:潘剑锋等[15] 对氢氧预混合气体的催化燃烧进行了数值模拟,得 出一系列催化条件下的燃烧特性。上述文献初步讨 论了催化剂单元所引起的表面反应对原有气相反应 的影响,但是主要研究集中在催化后的性能,忽略了 表面反应与气相反应间的耦合关系,对于内在的影 响机理也并没有形成共识。本文采用数值模拟方 法,研究氢氧预混合气体在部分催化燃烧室内的燃 烧特性,并探讨微尺度条件下表面、气相反应之间的 相互耦合关系。

## 1 计算模型和反应机理

计算中采用的物理模型是一长度 L = 10 mm,宽 度 W = 10 mm,高度 H = 1 mm,壁厚 0.4 mm 的局部 催化燃烧室。其横截面为矩形,催化带宽度与燃烧 室内部宽度保持一致,其二维剖面图如图 1 所示。 燃烧室材料采用 SiC,催化剂为金属 Pt,浸渍在入口 内壁前 2 mm 内的内上壁面处,负载密度:2.71 ×  $10^{-9}$  kg·mol/m<sup>2</sup>。由于燃烧室结构规则,采用了结 构化的网格划分方法,共划分 152 140 个网格。SiC 物性参数:密度为 3 100 kg/m<sup>3</sup>,比热为 275 J/(kg·K), 导热系数为 92 W/(m·K);Pt 的物性参数为:密度为 21 450 kg/m<sup>3</sup>,比热为 130 J/(kg·K),导热系数为 76 W/(m·K)。



本文所研究的微燃烧室,其特征尺度在1.13~

1.82 mm之间,计算所得 Kn 数远小于 10<sup>-3</sup>,说明仍 属于连续介质问题, Navier – Stokes 方程和傅里叶导 热定律依然适用。描述物理模型的数学模型包含的 控制方程参见文献[16]。文中假设忽略体积力、流 动耗散和内部气体辐射效应。流动模型选择层流模 型, 忽略燃烧过程中湍流脉动现象, 采用层流有限速 率燃烧模型。

燃烧过程中,入口取速度边界条件,出口为自由 出流边界条件。通道外壁面采用综合换热边界条 件。其中综合换热系数计算方法参见文献[17]。

模拟中,氢气和氧气的空间气相反应采用 Miller等<sup>[18]</sup>提出的反应机理,包含8种组分和19步 基元反应;表面反应采用 Deutschmann等<sup>[19]</sup>提出的 氢气在 Pt 表面上的催化反应机理,涉及5种表面组 分:H(s)、O(s)、OH(s)、H<sub>2</sub>O(s)、Pt(s)和6种气相 组分:H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、OH、H<sub>2</sub>O。

通过网格可靠性检查发现采用尺寸 0.2 mm 单 元网格时既节省计算时间,又能获得好的计算精度。

为便于表述,文中将局部布置催化单元的内部 上壁面简称"内上壁面",与之关于 *x* 轴对称的内部 下壁面简称"内下壁面"。"上下壁面内侧"数据均 取自距内上下壁面 0.01 mm 处。

## 2 计算模型的验证

为验证模型的准确性和可靠性,采用内部尺寸 为 10 mm × 6 mm × 0.6 mm、壁厚为 0.3 mm 的微燃 烧室,在当量比  $\phi$  为 1、流量 Q 为 600 cm<sup>3</sup>/min 时, 利用现有计算模型将模拟与实验<sup>[20]</sup>的结果进行对 比,其外壁面中心线温度见图 2。



模拟所得的结果与实验测得的数据最大误差约 5.04%。从图中可以看出曲线具有较好的一致性,可 验证计算模型的准确性。在图中距离约大于5mm后, 催化条件下模拟和实验对比结果随距离增加偏差增 大,主要是由于表面反应加快了燃料的消耗,反应物 浓度降低,但计算时由于表面反应更为理想,效果更 为显著,所以到接近出口时反应没有实验时剧烈。

#### 3 计算结果与分析

#### 3.1 不同流速时的影响

入口气流速度改变反应物浓度分布和热量传递的变化,从而对气相反应和表面反应产生影响。计算中入口速度 v 分别选为 0.5、1.0、2.0、3.0 m/s,对应流量分别为 300、600、1 200、1 800 cm<sup>3</sup>/min。

OH 基浓度是目前公认的表征反应剧烈程度的 重要指标,图 3 所示为内上下壁面内侧 OH 基质量 分数随入口流速的变化曲线。在不同流速下,内上 壁面附近 OH 基浓度均要小于相同位置内下壁面, 这主要是由于 Pt 催化剂对 OH 基有很强的吸附性 而导致的。在流速过小时,一方面由于燃料总体释 放热量有限,不利于发生强烈的气相反应,自由基浓 度也处在较低水平。另一方面,尽管气体燃料扩散 能力随着流速的降低而下降,但反应物与催化面的 接触时间却变长,利于表面反应的发生。两方面的 共同作用导致在小流速下内上壁面催化段的 OH 基 质量分数最小。图 4 为 x < 2 mm 范围内的变化曲 线,可以明显看出这一变化趋势。



在内上壁面附近,OH 基质量分数在催化段后 迅速跃升,使得在距离进口 2 mm 附近形成明显拐 点,改变了 OH 基浓度随入口距离的变化趋势。虽 然 x 大于 2 mm 的区域内没有催化剂,但是催化反应 所释放的反应热使得燃烧反应物有足够能量继续反 应生成 OH 基,促进在此区间的空间反应,加之不存 在表面吸附作用,导致了 OH 基的跃升。此后随着 空间反应的继续,OH 基浓度逐渐降低。

入口流速对通道内部传热也会产生影响,取上 述入口流速时内上下壁面内侧温度的分布进行研 究,计算结果如图5所示。

催化反应会消耗反应物并释放热量,使得上壁



Fig. 4 Mass fraction of OH radical near catalyst segmentation



Fig. 5 Temperature distribution near inner up and down walls

面内侧(催化剂所在壁面)温度均高于下壁面内侧。 从图5可以看出,该温差随着流速增加而显著增加, 但沿气流方向内上下壁面的温差却逐渐缩小,反映 出局部表面反应对空间反应的影响有一定限度。在 流速较小时,内部上下壁面之间的温差极小,几乎可 以忽略。其主要原因在于:流速较小时气相反应火 焰核心相比流速较大时更接近入口段,与催化面所 在位置大致重合。气相反应放热使内壁面温度同步 升高,基本掩盖了局部催化反应所导致的内部上下 壁面温差。

#### 3.2 不同当量比时的影响

选择入口流速 2.0 m/s,当量比 Φ 分别为 0.4、 0.8、1.0、1.4、1.8,分析温度场和浓度场的变化,研 究当量比 Φ 对燃烧的影响。图 6、图 7(为图 6 的局 部放大)和图 8 所示为入口速度恒定时,内上下壁 面 0H 基质量分数和温度随当量比的变化趋势。

同一当量比下,上下壁面附近 OH 基浓度均为 内下壁面高于内上壁面,主要原因仍然为表面反应 对 OH 基的吸附作用。由图 6 可见两壁面之间的差 值随当量比的增加呈现先增大后减小的规律,且以 当量比为 1.0 时最为明显。主要是因为在固定流速 下,当量比为 1.0 时表面反应最为剧烈,此时气相反 应产生的 OH 基质量分数的增幅不足以抵消表面反 应吸附 OH 基而导致其质量分数的减幅,导致在此 当量比下,组分差值达到最大。而在氧气大幅过量











Fig. 7 Mass fraction of OH radical near catalyst segmentation





或者过于不足时,均不利于气相反应的发生。此外 产生的 OH 基有限,表面反应也比较弱,不能明显影 响气相反应,燃烧室内上下壁面 OH 基质量分数差 距逐渐缩小。

图 8 为不同当量比下上下壁面内侧温度随当量 比的变化曲线。计算结果反映出温度高低与当量比 大小之间呈非线性变化。当量比较小(*Φ*≤1.0,贫燃 条件)时,两壁面温度和其温差随着 *Φ* 增加而增加。

在当量比较大(Φ>1.0,富燃条件)时,两壁面 温度和其温差随着Φ增加而降低和减小。合适的 当量比使燃烧和放热更加充分,因此在当量比约为 1.0时,内上下壁面温度接近最大,其中表面反应在 壁面处放出的热量是导致两内壁面造成显著温差的 主要原因。

#### 3.3 不同通道高度时的影响

通道高度的变化将直接改变燃烧室面容比,对 微尺度燃烧特征有一定影响。为研究通道高度对燃 烧带来的影响,选择当量比为1.0,入口流量均为 1200 cm<sup>3</sup>/min,通道高度分别为0.6、0.8、1.0 mm 进 行相关研究。

图9给出了在不同通道高度下,上下壁面内侧 附近OH基沿通道轴向分布,x小于2mm范围内的 变化曲线见图10。从图中可以看出,通道高度对上 壁面内侧的OH基浓度有一定影响。保持流量不 变,减小通道高度会使流速增加,缩短了反应物与催 化面接触时间,降低了吸附自由基的几率。OH自 由基在浓度差驱使下向催化面扩散,综合作用的结 果使得在催化面所处的2mm范围内,催化面附近 OH基浓度差别并不明显。文献[21]认为在此条件 下实际是质量流量对表面反应速度起到了决定性作 用而导致的。在通道前2mm长度内,高流速导致 的强烈气相反应使得上下壁面内侧的OH基质量分 数的差距随通道高度的减小(即流速升高)而显著 扩大。



up and down walls





在下游非催化段,壁面附近的空间反应强度恢 复到了前端无催化时的水平。此时在该区间内已经 不存在吸附 OH 基和抑制气相燃烧的表面反应,并 且由于通道高度的减小,外壁面更加接近火焰核心, 使壁面附近的 OH 基质量分数增加。

图 11 所示为不同通道高度内上下壁面附近温 度的变化趋势。从图中可以看出,高度通道越小,内 上下壁面温度反而越高。其原因主要为两方面:一 方面,通道高度较小时,相同流量时流速较大,组分 扩散能力更强,燃烧更加充分。另一方面,通道高度 较小时壁面更接近火焰高温区域,高温区域对壁面 的加热以及壁面对内部预混合气体之间的换热更加



Fig. 11 Temperature distribution near inner up and down walls

充分,使空间反应加速。此外,减小通道高度,火焰 沿流动方向变长,高温区域扩大,这也导致通道高度 为0.6 mm时的上下壁面内侧温度始终最高。

### 4 结论

(1)气体流速同时影响表面和空间反应。流速 增大,混合气体与催化面接触时间减少,表面反应强 度下降,气相反应增强。在内上壁面,流速越大,表面 反应对催化段下游的空间反应促进作用越明显。此外 表面反应放热导致了内上下壁面附近产生温差。

(2)当量比对表面和空间反应的影响呈现非线 性特征,氧气大幅过量或者过于不足,表面反应对气 相反应抑制较强。当量比为1.0时,表面反应明显 促进了气相反应。

(3) 在相同流量下,通道高度变化对表面反应 影响较弱,但对催化段内的气相反应有明显抑制作 用。小通道高度时壁面更加靠近火焰中心,使外壁 面温度升高。

#### 参考文献

- 1 Wan J, Fan A. Effect of channel gap distance on the flame blow-off limit in mesoscale channels with cavities for premixed CH<sub>4</sub>/air flames [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 132: 99 107.
- 2 蒋利桥. 微尺度火焰及微燃烧器的稳燃强化技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2008. Jiang Liqiao. Study of micro flames and combustion stability enhanced technology in micro combustor[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- 3 甘云华,罗燕来,田中华. 燃料流量与管径对受限空间下微小火焰的影响分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 323-328. Gan Yunhua, Luo Yanlai, Tian Zhonghua. Effects of fuel flow rate and burner nozzle diameter on small flame characteristic in confined space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 323-328. (in Chinese)
- 4 Klvana D, Chaouki J, Guy C, et al. Catalytic combustion: new catalysts for new technology [J]. Combustion Science and Technology, 1996, 121:51-65.
- 5 Spivey J J. Catalysis in the development of clean energy technologies [J]. Catalysis Today, 2005, 100(1-2): 171-180.
- 6 Wang Yang, Zhou Zhijun, Yang Weijuan, et al. Combustion of hydrogen-air in micro combustors with catalytic Pt layer [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(6): 1127 - 1133.
- 7 Ju Yiguang, Maruta K. Microscale combustion: technology development and fundamental research [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669 715.
- 8 Di Benedetto A, Di Sarli V, Russo G. Effect of geometry on the thermal behavior of catalytic micro-combustors [J]. Catalysis Today, 2010,155(1-2):116-122.
- 9 Chen Guan-Bang, Chen Chih-Peng, Wu Chih-Yung, et al. Effects of catalytic walls on hydrogen/air combustion inside a microtube[J]. Applied Catalysis, 2007, 332(1):89-97.
- 10 Li Yueh-Heng, Chen Guan-Bang, Wu Fang-Hsien, et al. Effects of segmentation with caties on combustion enhancement of blended fuels in a micro channel [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(4):1644-1651.
- 11 Zade Q A, Renksizbulut M, Friedman J. Contribution of homogeneous reactions to hydrogen oxidation in catalytic microchannels [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(2): 784 - 792.
- 12 伍亨,钟北京.空间反应和入口速度对甲烷催化反应的影响[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(5):670-672,676. Wu Heng, Zhong Beijing. Influence of the gas-phase reaction and the inlet velocity on the catalytic reaction of CH<sub>4</sub>[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2005,45(5):670-672,676. (in Chinese)
- 13 吴晟,冉景熠,蒋文萍. 微圆管内甲烷催化着火的实验和数值研究[J]. 工程热物理学报,2013,34(11):2194-2197.
  Wu Sheng, Ran Jingyi, Jiang Wenping. Experimental and numerical study of methane catalytic ignition in a micro-tube[J].
  Journal of Engineering and Thermalphysics,2013,34(11):2194-2197. (in Chinese)
- 14 徐侃,刘明侯,张先锋,等.表面催化反应对小尺度空间气相燃烧的影响[J].燃烧科学与技术,2009,15(2):191-197.
  Xu Kan, Liu Minghou, Zhang Xianfeng, et al. Effect of surface catalytic reaction on gas phase combustion inside miniscale

combustor[J]. Journal of Combustion and Science and Technology, 2009, 15(2):191-197. (in Chinese)

- 15 潘剑锋,范宝伟,吴庆瑞,等.微尺度下氢氧预混合气催化燃烧的研究[J].机械工程学报,2011,47(24):111-116. Pan Jianfeng, Fan Baowei, Wu Qingrui, et al. Study on catalytic combustion of premixed hydrogen and oxygen in the micro-scale [J]. Journal of Mechanical Engineering,2011,47(24):111-116. (in Chinese)
- 16 唐爱坤.平板式微热光电系统能量转换过程的研究[D].镇江:江苏大学,2011. Tang Aikun. Study of energy transition process in the plane cell type micro-thermophotovoltaic system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
- 17 戴锅生. 传热学 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- 18 Miller J A, Bowan C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1989, 15(4):287-338.
- 19 Deutschmann O, Schmidt R, Behrendt F, et al. Numerical modeling of catalytic ignition [J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(1):1747-1754.
- 20 潘剑锋,吴庆瑞,薛宏,等. 微平板式燃烧室内催化燃烧的试验研究[J]. 工程热物理学报,2011,32(8):1430-1432. Pan Jianfeng, Wu Qingrui, Xue Hong, et al. Experimental investigation of catalytic combustion in a planar micro combustor[J]. Journal of Engineering and Thermalphysics,2011,32(8):1430-1432. (in Chinese)
- 21 曾文.催化燃烧的数值模拟及其在均质压燃(HCCI)发动机中应用的基础研究[D].大连:大连理工大学,2006. Zeng Wen. Numerical simulation of catalytic and its application of HCCI engine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)

#### (上接第 390 页)

- 14 Quoilin S, Broek M V D, Declaye S, et al. Techno-economic survey of organic Rankine cycle (ORC) systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 22(8): 168-186.
- 15 Borsukiewicz-Gozdur A. Pumping work in the organic Rankine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1-2): 781-786.
- 16 Reid A D. Low temperature power generation using HFE 7000 in a Rankine cycle [D]. San Diego: San Diego State University, 2010.
- 17 Quoilin S, Lemort V, Lebrun J. Experimental study and modeling of an organic Rankine cycle using scroll expander [J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1260 - 1268.
- 18 Mathias J A, Johnston J R, Cao J M, et al. Experimental testing of gerotor and scroll expanders used in, and energetic and exergetic modeling of an organic Rankine cycle [J]. ASME Journal of Energy Resources Technology, 2009, 131(1): 21-24.
- 19 Jung H C, Taylor L, Krumdieck S. An experimental and modelling study of a 1 kW organic Rankine cycle unit with mixture working fluid [J]. Energy, 2015, 81: 601-614.
- 20 蔡永生. 氨液再循环系统中氨泵最小倒灌高度的计算与分析[J]. 制冷与空调,2009,9(3):98-101. Cai Yongsheng. Calculation and analysis of ammonia pump minimal head in ammonia liquid overfeed system [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2009, 9(3): 98-101. (in Chinese)
- 21 林芃. 氨水降膜吸收传热传质机理及其在两级风冷吸收制冷中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2011. Lin Peng. Theoretical and experimental investigation of NH<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>O falling film absorption and its application in two-stage aircooled absorption refrigeration [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- 22 舒欢,谢应明,白武周,等. CO<sub>2</sub> 复叠式制冷低压循环储液罐的安装高度研究[J]. 低温与超导, 2012,20(10):70-74. Shu Huan, Xie Yingming, Bai Wuzhou, et al. Study on the installation height of reservoir in low-pressure circuit of CO<sub>2</sub> cascade refrigeration system [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2012, 20(10): 70-74. (in Chinese)
- 23 Miao Z, Yang X F, Xu J L, et al. Operation and performance of a low temperature organic Rankine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75(22): 1065 1075.
- 24 Dumont O, Quoilin S, Lemort V. Experimental investigation of a reversible heat pump/organic Rankine cycle unit designed to be coupled with a passive house to get a net zero energy building [J]. International Journal of Refrigeration, 2015,54: 190 - 203.
- 25 Yang X F, Xu J L, Miao Z, et al. Operation of an organic Rankine cycle dependent on pumping flow rates and expander torques [J]. Energy, 2015, 90: 864 - 878.
- 26 杨绪飞,邹景煌,戚风亮,等.用于有机朗肯循环的三柱塞泵运行性能实验[J].农业机械学报,2015,46(8):367-371,378. Yang Xufei, Zou Jinghuang, Qi Fengliang, et al. Experiment on tri-plunger pump performance in organic Rankine cycle system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 367-371,378. (in Chinese)
- 27 李晶.太阳能有机朗肯循环中低温热发电系统的数值优化及实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2011. Li Jing. Optimization and test of low-medium temperature solar thermal electric generation using organic Rankine cycle [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)