

# 煤高温气化—高温贫氧燃烧一体化系统的研究与开发

蔡九菊, 田红, 王连勇, 王爱华

(东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 针对国内大部分中小型工业炉窑采用传统直燃煤工艺引发的能源和环境等问题, 自行开发设计了煤高温气化与高温贫氧燃烧一体化系统。介绍了该系统的工艺路线和热工特性, 应用实验研究和数学模拟相结合的方法, 研究了一体化系统的煤气化及燃烧特性。研究结果表明: 提高空气气化剂温度, 可降低空煤比, 提高煤气热值、气化效率和气化强度; 当空气气化剂温度从常温提高到 1050℃时, 煤气热值将提高 33%, 空煤比减小 43%, 气化强度提高近一倍; 提高助燃空气温度, 将使燃气加热炉内的火焰容积扩大, 炉温分布趋于均匀, 热效率显著增加, NO<sub>x</sub> 生成浓度大幅度降低。该系统与常温煤气化炉和换热式轧钢加热炉系统相比, 系统热效率将提高一倍以上, 单位产品能耗降低 50%。

**关键词:** 煤气化; 高温贫氧燃烧; 气化剂温度; 助燃空气温度; 热效率; 热衔接

中图分类号: TK16 文献标识码: A

## 引言

煤炭在我国一次能源消耗结构中占 70% 左右, 而且在可以预见的未来, 这种以煤为主的能源结构不会发生根本变化<sup>[1]</sup>。我国现有燃煤设备几十万台, 其中大部分中小型燃煤工业炉窑采用的仍是传统直燃煤工艺, 这种工艺的煤炭转换效率低, 同时排放大量的灰渣、粉尘与 SO<sub>2</sub>, 造成了能源的大量浪费和环境的严重污染; 目前只有少量的燃煤工业炉采用煤气化技术, 其中固定床式气化炉约占 90%, 普遍存在制气热值低、热能利用率低和气化强度低等问题。因此, 为了提高煤炭资源的利用效率, 降低煤直接燃烧过程中的环境污染, 需要研究开发燃煤新方法和新工艺, 以减轻资源短缺与环境污染带来的双重压力<sup>[2~4]</sup>。

新型高温贫氧燃烧 (High Temperature Air Combustion, 简称 HiTAC) 技术目前还不能直接应用于燃煤工业炉<sup>[5]</sup>, 所以对煤等固体燃料, 可考虑首先对其进行高温气化并制备优质煤气, 然后在燃烧装置中实施高温贫氧燃烧, 从而避免直燃煤引起的各种污染。因此, 如能将煤的高温气化和高温贫氧燃烧两种技术有机结合<sup>[6~7]</sup>, 充分利用后者排放的高温烟气余热来预热空气, 将其中一部分高温空气供给加热炉用作助燃剂, 剩余部分供给煤气化炉用作气化剂。将煤气化产生的热煤气再作为加热炉的燃料, 并在加热炉内组织贫氧燃烧, 一定能大幅度提高系统的能源效率与环境效率, 取得相得益彰的效果。

## 1 煤高温气化与高温贫氧燃烧一体化的系统设计

煤高温气化与高温贫氧燃烧一体化系统主要由煤气化炉、燃气加热炉、蓄热式换热器及其换向装置等部分组成, 如图 1 所示。该系统的工作原理为: 首先, 煤在煤气化炉内以高温空气和蒸汽为气化剂完成煤高效制气过程, 并将热煤气 (> 600℃) 经管道直接输送至燃气加热炉; 然后, 热煤气在燃气加热炉内与来自蓄热式换热器的高温空气 (> 1000℃) 混合完成高温贫氧燃烧和炉内物料的加热过程; 最后, 高温燃烧产物通过蓄热式换热器, 在四通换向阀的作用下周期式地完成它与空气之间的热交换过程, 并将冷空气预热到 1000℃ 以上的高温; 高温空气的一部分作为助燃空气供给燃气加热炉, 另一部分作为煤的气化剂 (> 1000℃) 在三通阀的控制下供给煤气化炉。

收稿日期: 2007-04-28

基金项目: 国家重点基础研究计划“973”基金资助项目 (2005CB724206); 国家自然科学基金重大研究计划基金资助项目 (90210028); 国家自然科学基金重点基金资助项目 (50334020)

作者简介: 蔡九菊 (1948—), 男, 辽宁锦州人, 东北大学教授, 博士生导师。

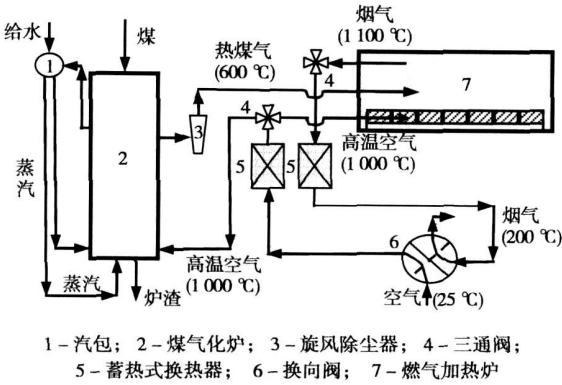


图 1 煤高温气化与高温  
贫氧燃烧一体化系统结构

煤高温气化与高温贫氧燃烧系统的特点：(1) 用燃气加热炉排出的高温烟气预热空气气化剂，可将空气加热到 1 000 ℃以上，煤气热值和气化效率显著提高，分别在 6 600 kJ/m<sup>3</sup> 和 75% 以上。(2) 省去了煤气净化冷却装置，将热煤气直接送往燃气加

热炉，不仅能使焦油伴随煤气一起烧掉，而且还能充分利用煤气携带的物理热，可使炉子热效率提高 10% 以上。(3) 采用陶瓷球蓄热室技术最大限度地回收燃气加热炉的烟气余热，控制排烟温度低于 200 ℃，产生的高温空气 (> 1 000 ℃) 不仅为燃气加热炉提供高温助燃空气，而且为煤气化炉提供了经济的高温空气气化源。

2 关键技术研究

2.1 高温空气煤气化特性

2.1.1 煤气化特性的实验研究

采用实验室实验的方法对系统中煤气化炉的高温空气煤气化特性进行了研究。高温空气煤气化实验装置由气化实验炉、空气加热器和蒸汽发生器等组成。实验采用烟煤为原料，蒸汽和高温空气分别由蒸汽发生器和空气加热器制取，煤气成分用气相色谱仪 (Aglient 6890) 进行检测。实验用煤的工业分析数据和气化实验炉的性能指标如表 1 所示。

表 1 煤的工业分析数据和气化实验炉的性能指标

烟煤的工业分析/ %				LHV	压力	气化炉	气化床	粒度
水分	灰分	挥发分	固定碳	/ kJ·kg <sup>-1</sup>	/ Pa	直径/ m	高度/ m	/ m
5.9	13.6	29.0	51.5	27 900	1 500~2 000	0.2	2	0.02

表 2 是空气气化剂温度分别取 600、800 ℃时的实验结果。由表 2 可知，随着空气气化剂温度的提高，空煤比下降，煤气中 CO、H<sub>2</sub> 等可燃成分的浓度上升，CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 浓度下降，煤气热值增加。煤气热值增加的原因：一方面是空气气化剂温度提高使炉内还原层的反应温度上升，促进了炉内的二氧化碳还原和水蒸气分解等气—固相反应，有利于可燃成分

CO、H<sub>2</sub> 的生成，反应速率就越快，产生的 CO 和 H<sub>2</sub> 的含量也就越多。另一方面是提高空气气化剂温度使空气带入炉内的物理热增加，减少了为煤气化反应提供热量的碳燃烧反应份额，使单位质量煤气化所需的空气量减少，由空气带入炉内的 N<sub>2</sub> 含量和燃烧生成的 CO<sub>2</sub> 浓度下降。

表 2 气化实验炉的实验结果

气化剂温度 / ℃	气化强度 / kg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>	汽煤比 / kg·kg <sup>-1</sup>	空煤比 / m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup>	CO / %	H <sub>2</sub> / %	CH <sub>4</sub> / %	CO <sub>2</sub> / %	N <sub>2</sub> / %
600	411	0.9	1.6	16.1	22.4	1.7	11.0	46.4
800	411	0.9	1.4	17.2	24.1	1.7	10.2	44.1

2.1.2 煤气化特性的数学模拟

为了深入研究高温空气煤气化特性，以生产中的煤气化炉为模拟对象，依据动量守恒、质量守恒、能量传递及反应工程理论，建立了高温空气煤气化过程数学模型，应用数学模型分析了空气气化剂温

度变化对煤气热值和气化强度的影响。

在保持料层高度 (1.85 m)、气化强度 (513 kg/(m<sup>2</sup>·h)) 和水蒸气流量 (3 643 kg/h) 不变时，空气气化剂温度对煤气热值和空煤比的影响分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 可见，随着空气气化剂温度的

提高, 煤气热值显著增加, 由  $6\,576\text{ kJ/m}^3$  增加到  $7\,244\text{ kJ/m}^3$ , 增加幅度为  $10.2\%$ ; 与此同时, 气化效率由  $78.13\%$  升高到  $81.92\%$ 。由图 3 可见, 随着空气气化剂温度提高, 空煤比从  $1.46\text{ m}^3/\text{kg}$  下降到  $1.26\text{ m}^3/\text{kg}$ , 下降幅度为  $13.7\%$ 。与常温空气煤气化(煤气热值  $5\,443\text{ kJ/m}^3$ , 空煤比  $2.2\text{ m}^3/\text{kg}$ )相比<sup>[8]</sup>, 高温空气煤气化(气化剂温度为  $1\,050\text{ }^\circ\text{C}$  时)的煤气热值提高  $33\%$ , 空煤比却降低了  $43\%$ 。

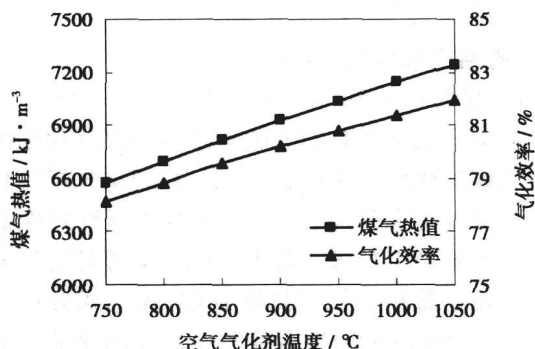


图 2 气化剂温度对煤气热值及气化效率影响

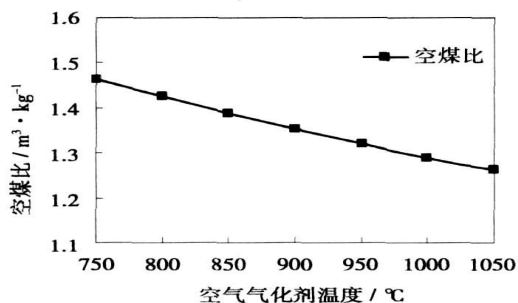


图 3 空煤比随气化剂温度的变化

在空气流量 ( $4\,906\text{ m}^3/\text{h}$ )、水蒸气流量 ( $3\,643\text{ kg/h}$ ) 和料层高度 ( $1.85\text{ m}$ ) 保持不变时, 改变空气气化剂温度对气化强度的影响如图 4 所示。随着空气气化剂温度的提高, 气化反应温度相应增加, 加快了煤气化反应速率, 缩短了单位质量煤的气化时间, 使气化强度由  $750\text{ }^\circ\text{C}$  的  $469\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  提高到  $1\,050\text{ }^\circ\text{C}$  的  $554\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ , 增加幅度  $18.3\%$ 。当空气气化剂温度为  $1\,050\text{ }^\circ\text{C}$  时, 气化强度比常温空气煤气化 ( $290\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ) 提高近一倍<sup>[8]</sup>。尽管气化强度的提高会缩短煤与  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的接触时间, 但气化温度提高加快反应速率的积极作用, 足可以弥补反应时间缩短产生的不利影响, 故煤气化强度、煤气热值和气化效率都有相应提高, 如图 5 所示。如果过度提高煤

气化强度, 将造成碳反应不完全, 灰渣中残碳含量增加, 煤气热值和气化效率下降, 恶化了煤气化过程。

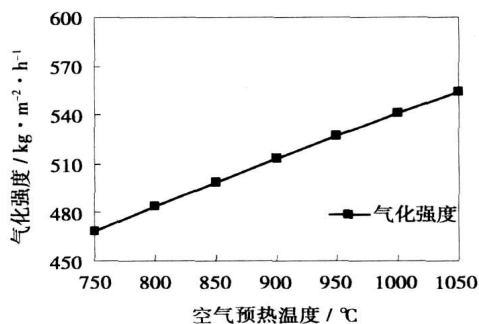


图 4 气化剂温度对煤气化强度影响

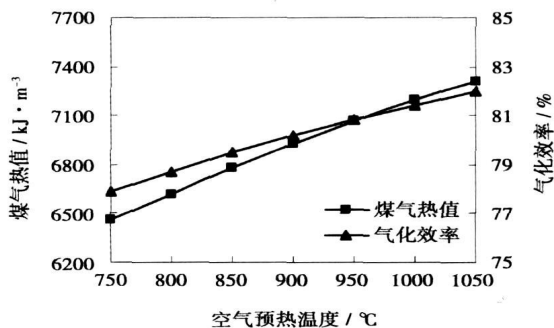


图 5 气化剂温度对煤气热值及煤气化效率影响

必须说明, 就常压固态排渣的煤气化炉而言, 空气气化剂温度的提高受到煤结渣温度的限制, 因此煤气热值和气化强度的提高也是有限的。如果采用液态排渣或卵石床气化炉工艺, 提高空气气化剂温度对强化气化过程以及改善煤气化指标会更加明显。

## 2.2 高温贫氧燃烧特性的数学模拟

利用自行开发的由流动、燃烧、传热和  $\text{NO}_x$  湍流生成等模块组成的计算机模拟程序, 以燃气实验炉 ( $600\text{ mm}\times 280\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ ) 为模拟对象, 在高温贫氧燃烧耦合辐射传热过程模拟计算的基础上<sup>[9]</sup>, 联立求解高温贫氧燃烧过程  $\text{NO}$  湍流生成的控制方程, 模拟了不同助燃空气温度对燃气加热炉温度场和  $\text{NO}_x$  浓度场的影响。

### 2.2.1 空气预热温度对加热炉温度场的影响

图 6 为燃气实验炉沿炉长方向温度场通过火焰中心的纵向剖面图。由图 6 可见, 当助燃空气不预热时, 由于燃烧反应只在炉内局部空间进行, 故高温火焰区短窄, 且炉内温差大。火焰区最高温度达  $1\,764\text{ }^\circ\text{C}$ , 出口温度平均为  $890\text{ }^\circ\text{C}$ , 炉内最大温差约

863 ℃; 当助燃空气预热温度为 1 000 ℃时, 高温区占据炉膛的较大空间, 火焰区变粗变长, 容积成倍增大, 炉内温差降低, 温度分布趋于均匀。火焰区最高

温度为 1 645 ℃, 出口温度平均为 1 375 ℃, 炉内最大温差为 256 ℃。炉膛温度的整体水平升高, 能量利用趋于合理, 提高了炉子热效率。

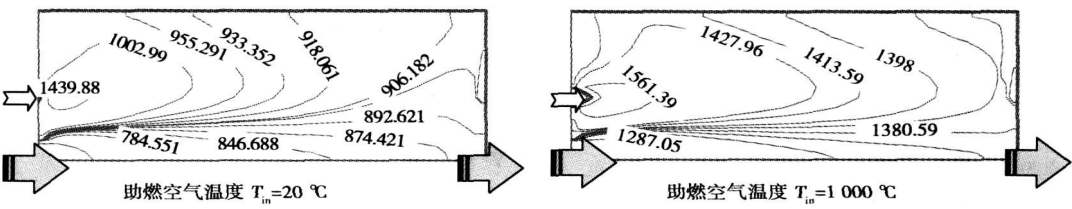


图 6 不同助燃空气温度条件下加热炉温度场纵向剖面图

2.2.2 空气预热温度对加热炉 NO<sub>x</sub> 浓度场的影响  
高温贫氧燃烧生成的 NO<sub>x</sub>, 以热力型 NO 为主。图 7 是在不同助燃空气温度条件下沿炉长方向通过火焰中心的 NO 浓度分布。当助燃空气温度为 20 ℃时, NO 出口浓度约为 306 mg/m<sup>3</sup> (以 11% 含氧量为

基准, 下同), 当助燃空气温度为 1 000 ℃时, 炉膛温度场分布趋于均匀, 避免了因局部高温而生成大量 NO, 且热力 NO 生成缓慢, 在炉膛出口处 NO 浓度只有 31.7 mg/m<sup>3</sup>, 仅为传统燃烧条件下热力 NO 生成量的 10%。

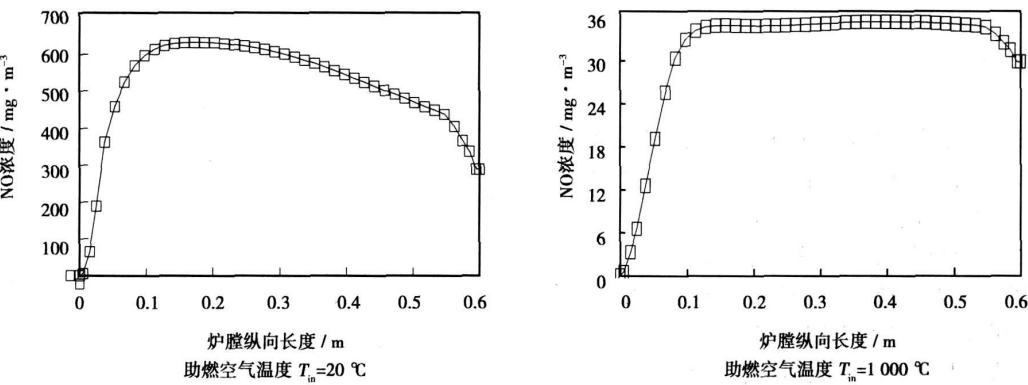


图 7 不同助燃空气温度条件下加热炉纵向 NO 浓度分布

3 煤高温气化与高温贫氧燃烧一体化的系统热效率

以高温气化炉和燃气加热炉(取某厂蓄热式轧钢加热炉实际数据)为研究对象, 一体化系统的操作参数如表 3 所示, 用模型化方法模拟煤高温气化过程、高温

贫氧燃烧过程以及两者间的热衔接过程。根据模拟结果绘制出整个系统的能流图, 如图 8 所示。从图 8 可以看出, 煤高温气化与高温贫氧燃烧过程的系统热效率约高达 75.4%, 单位产品(钢坯)能耗(标煤)只有 40 kg/t。比采用常温煤气化炉的换热式轧钢加热炉的系统热效率提高一倍以上<sup>[10]</sup>, 单位产品能耗下降近 50%。

表 3 一体化系统的操作参数

煤气化炉		气化/助燃 空气温度/℃	燃气加热炉(钢坯常温入料)		
给煤量 / kg · h <sup>-1</sup>	空气气化剂流量 / m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>		助燃空气流量 / m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	炉子产量 / t · h <sup>-1</sup>	钢坯出炉温度 / ℃
3 626	4 856	900	16 444	90	1 200

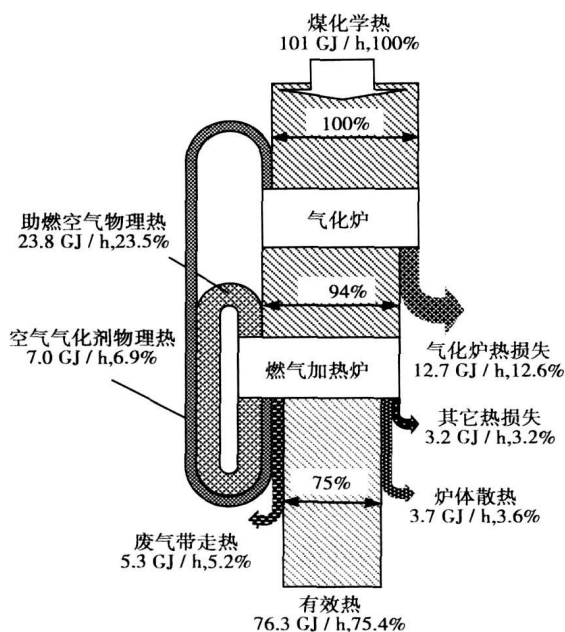


图 8 煤高温气化与高温贫氧  
燃烧一体化系统能流图

## 4 结 论

(1) 将高温空气煤气化技术和高温贫氧燃烧技术相结合, 实现了在高温条件下煤的高效气化和在贫氧条件下的清洁燃烧, 以及煤的气化装置与燃烧装置之间的热衔接, 系统热效率达到 75%, 燃气加热炉的产品(钢坯)能耗(标煤)为 40 kg/t, 比采用常温空气煤气化炉的换热式轧钢加热炉的系统热效率提高一倍以上, 单位产品能耗降低近 50%;

(2) 提高煤气化炉的空气气化剂温度, 可降低空煤比, 增加煤气热值、煤气化效率和气化强度。当

空气气化剂温度为 1 050 ℃时, 与常温空气煤气化炉相比, 煤气热值提高 33%, 空煤比降低 43%, 气化强度提高近一倍;

(3) 当燃气加热炉采用高温贫氧燃烧时, 提高助燃空气温度可使燃气加热炉内的高温火焰充满炉膛, 炉膛温度分布趋于均匀, 热效率提高, NO<sub>x</sub> 生成浓度降低。

## 参考文献:

- [1] LI Y H, XU X C, LI Z, et al. Technology of coal utilization as high efficiency and low pollution energy // Proceedings of International Conference on Engineering and Technological Sciences 2000 [C]. Beijing: New World Press, 2000. 218—230.
- [2] WATKINSON A P, LUCAS J P, LIM C P. A prediction of performance of commercial coal gasifier [J]. Fuel, 1991, 70(4): 519—523.
- [3] GOLDEMBERG J. Energy, environment and development [M]. London: Earthscan Publication Ltd, 1996.
- [4] ROTHENBERGER K S, CUGINI A V, THOMPSON R L, et al. Investigation of first stage liquefaction of coal with model plastic waste mixtures [J]. Energy & Fuels, 1997, 11(4): 849—855.
- [5] 森田光宣, 持田晋, 村上英, 等. 高温空燃燃烧の特性(II) [J]. 日本工ネルギー学会志, 2001, 3(80): 177—182.
- [6] 蔡九菊, 于娟, 赵海. 冶金炉用填充球蓄热室传热过程的数学模拟及热工特性 [J]. 金属学报, 2000, 36(4): 417—421.
- [7] 王力军, 蔡九菊, 邹宗树, 等. 高温空气燃烧炉内湍流混合特性的数值研究 [J]. 计算物理, 2004, 21(3): 357—361.
- [8] 贺永德. 现代煤化工技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [9] WANG L J, CAI J J, ZOU Z S. Numerical analysis of flow velocity distribution in high temperature air combustion furnace // Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries [C]. Melbourne: CSIRO, 2003. 251—254.
- [10] 范垂刚. 热煤气在工业炉上的应用技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

(编辑 渠 源)

## 新 技 术

# LM2500+ 的设计修改能提高流量和功率

据《Gas Turbine World》2006 年 5~6 月号报道, GE Marine 对现有的 LM2500+ 进行一些设计修改以便增加它的输出功率并提高效率。

压气机部分的修改包括: 重新设计进口导叶、改变零级叶型的安装角; 改变转子的材料, 以提高高压压气机的寿命和耐久性。

在涡轮一侧, GE 重新设计了第一级高压涡轮叶片以便提供改进的冷却, 并涂上改进的耐腐蚀氧化涂层。

热障涂层的应用也已扩展到高压涡轮第一级喷嘴。

其它的升级改进包括修改第二级涡轮喷嘴的材料并改进其冷却; 为了增加寿命重新设计了第二级高压涡轮转子; 重新设计了 6 级动力涡轮中的第二级和第三级喷嘴以便增加输出功率。

(吉桂明 供稿)

By using SMPISO algorithm and high Reynolds  $k-\epsilon$  turbulent models, a numerical calculation and analysis was performed of the flow fields in the head portion of a steam turbine destined for power-plant feedwater pumps. The calculation domain includes the entire flow fields in the head portion, mainly involving the main steam quick-closing valve, regulating valves and stages. Maximum efforts have been made to ensure the absence of geometric distortions in order to guarantee the accuracy of calculation results. On the basis of flow analyses, an improvement in the steam admission chamber, regulating valves and profiles of the regulating stages has been conducted by employing a numerical test method, effectively lowering the total pressure loss of flows in various parts. With a simultaneous enhancement of steam turbine efficiency the operating stability of the regulating valves has been ensured. **Key words:** turbine, main steam quick-closing valve, regulating valve, regulating stage, numerical simulation, improvement in structure

某氦气压气机三维优化设计 = **The Three-dimensional Optimized Design of a Helium Compressor** [刊, 汉] / CHEN Ying, ZOU Ji-guo (Compressor Design Department, Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), WANG Song-tao (College of Energy Science and Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 504 ~ 511

By analyzing the features of the three-dimensional numerical simulation results for the design scheme of a helium compressor, given were the design direction and guiding principle for its three-dimensional optimized modification design. By employing such methods as adjusting the distribution of blade thickness and the curvature of blade trailing edge profile as well as terminal-bend technology etc., a full three-dimensional optimization design was performed of the aerodynamic design version of the prototype helium compressor. A contrast analysis was conducted of the numerical simulation results before and after the three-dimensional optimized design. The efficiency of the compressor after the three-dimensional optimized design has been increased by 2 percent, effectively limiting the further development of secondary flows. **Key words:** helium compressor, blade modeling, three-dimensional optimization, controllable diffusion blade profile

煤高温气化—高温贫氧燃烧一体化系统的研究与开发 = **Research and Development of an Integrated System Featuring Coal High-temperature Gasification-high-temperature Oxygen-deficient Combustion** [刊, 汉] / CAI Jiu-ju, TIAN Hong, WANG Lian-yong, et al (National Key Laboratory on Environmental Protection and Ecological Industry, Northeastern University, Shenyang, China, Post Code: 110004) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 512 ~ 516

To address the energy source and environment protection problems of the majority of medium and small-sized industrial furnaces or kilns in China due to the use of traditional direct coal-combustion technology, the authors have independently designed and developed an integrated system of coal high-temperature gasification and high-temperature oxygen-deficient combustion along with a description of the process chart and thermodynamic characteristics of the system. By a combination of experimental study and mathematical simulation, studied was the coal gasification and combustion characteristics of the integrated system. The research results show that by raising the temperature of the air gasification agent it is possible to reduce the air-coal ratio and enhance the coal-gas heat value, gasification efficiency and intensity. When the air gasification agent temperature is increased from the normal temperature to 1 050 °C, the coal gas heat value will be increased by 33%, the air-coal ratio reduced by 43%, and the gasification intensity almost doubled. To raise the temperature of the combustion-supporting air can enlarge the flame volume of combustion gas in the heating furnace and the furnace temperature distribution tends to be uniform, leading to a significant increase in thermal efficiency and a dramatic reduction in NO<sub>x</sub> generation concentration. The thermal efficiency of the above system will be more than doubled as compared with that of a normal-temperature coal-gasification furnace and a heat-exchange type of steel-rolling heating furnace system. Moreover, its unit product energy consumption will be reduced by 50%. **Key words:** coal gasification, high-temperature oxygen-deficient combustion, temperature of gasification agent, combustion-supporting air temperature, thermal efficiency, thermal connection