

Stirling 发动机燃烧及换热分析

沈建平 金东寒 顾根香
(中船总第七一一研究所)

[摘要] 基于碳氢燃料燃烧化学平衡反应计算,得到燃烧产物温度及组分成份,在此基础上计算燃气物性,从而计算了热气机外燃系统加热管的对流换热系数、辐射换热系数及后排换热管的肋片换热,对燃用空气和液氧两种燃烧情形进行了对比计算,并计算了各种因素对燃烧的影响,对计算结果进行了分析和讨论,得到了很有价值的结论,为热气机外燃系统结构设计提供了借鉴。

关键词 热气机 换热系数 燃烧 化学平衡

中图法分类号 TK1; TK124

0 前言

国民经济的发展及能源危机、环境保护等问题的日益严重都对动力工程提出了越来越苛刻的要求,特别是水下潜艇用动力,要求振动小、噪声低、排放隐蔽,更重要的是要能在脱离空气的特殊环境下工作。而热气机(Stirling engine)不仅能满足这些要求,它还具效率高、体积小、重量轻、能使用多种能源等优点,因而从它诞生的那天起就引起了研究者的极大兴趣,但由于热气机对制造技术和材料要求较高,只是到了最近才在某些特殊应用领域中得到了实用。

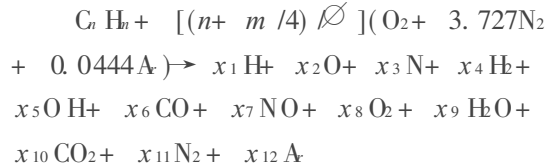
热气机外燃系统的优劣对性能影响很大,它不仅影响整机的功率和效率,还影响排放,并直接影响热头的热负荷,因而对整机寿命有决定性影响,因此外燃系统设计是至关重要的。对外燃系统的要求是燃烧均匀、彻

底、热头无局部过热、换热系数大、排放符合标准,因此在设计前后对外燃系统的换热进行预测和校核是十分必要的。

1 计算原理和方法

1.1 燃气温度和成分计算

燃气温度可用燃油燃烧的理论温度进行估算,碳氢燃料在空气中燃烧的反应方程式如下(考虑 12 种燃烧产物):



式中: ϕ 为燃空当量比,根据元素质量守恒可列出如下方程式:

$$C x_6 + x_{10} = n$$

$$H x_1 + 2x_4 + x_5 + 2x_9 = m$$

$$O: x_2 + x_5 + x_6 + x_7 + 2x_8 + x_9 + 2x_{10} = 2(n + m/4) \quad \text{①}$$

$$N: x_3 + x_7 + 2x_{11} = 7.454(n + m/4) \quad \text{②}$$

$$Ar: x_{12} = 0.0444(n + m/4) \quad \text{③}$$

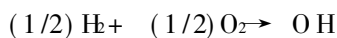
$$\text{总摩尔数: } N = \sum_{i=1}^{12} x_i$$

上面 6 个方程有 $x_1 \sim x_{12}$ 及 N 共 13 个未知数, 还需补充 7 个反应式及其平衡关系式如下:

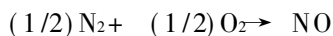
$$(1/2) H_2 \rightarrow H \quad K_1 = \frac{x_1}{x_4^{0.5} \left(\frac{P}{N}\right)^{0.5}}$$

$$(1/2) O_2 \rightarrow O \quad K_2 = \frac{x_2}{x_8^{0.5} \left(\frac{P}{N}\right)^{0.5}}$$

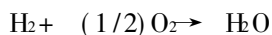
$$(1/2) N_2 \rightarrow N \quad K_3 = \frac{x_3}{x_{11}^{0.5} \left(\frac{P}{N}\right)^{0.5}}$$



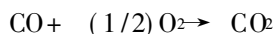
$$K_5 = \frac{x_5}{x_4^{0.5} x_8^{0.5}}$$



$$K_7 = \frac{x_7}{x_{11}^{0.5} x_8^{0.5}}$$



$$K^9 = \frac{x_9}{x_4 x_8^{0.5} \left(\frac{P}{N}\right)^{-0.5}}$$



$$K_{10} = \frac{x_{10}}{x_6 x_8^{0.5} \left(\frac{P}{N}\right)^{-0.5}}$$

各式中的平衡常数 K_i 可由热力学性质表查得。求解上面 13 个方程的方程组, 可求得系统在温度 T 压力 P 下的燃气组分 x_i 以及产物的焓、内能、气体常数和这些参数对压力、温度、空燃比的偏导数。

假设燃烧在定压、绝热的条件下进行, 则反应物的绝对焓等于生成物的绝对焓, 即:

$$(H_{T_0})_r = (H_{T_2})_p$$

式中: T_0, T_2 分别为系统燃烧前反应物的初温和燃烧后产物的终温。通过迭代可以求得系统产物终温 T_2 , 即燃气的温度, 具体计算流程如图 1

1.2 前后排加热管对流换热系数计算

燃气横掠单排管的换热准则方程式为 (由实验数据整理得到):

$$Nu = CR_m^m$$

其中: C, m 由实验分别确定。计算中用到的燃气物性参数由热力性质公式计算

1.3 辐射换热计算

由于燃气温度较高, 且燃气中的 CO_2 和 H_2O 等非透明的三原子组分份额较大, 尤其是当燃料在纯氧中燃烧时 (采用 CGR 技术), 除了燃气与加热管表面的对流换热外, 燃气与热头的辐射换热不容忽视, 其换热量有时高达 60%。根据 Lobo-Evans 辐射传热的计算方法, 燃气与管排间的辐射换热量由下式计算:

$$Q_R = F_{Aef} \left[\left(\frac{T_g}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_w}{100}\right)^4 \right] C_0$$

式中: T_w — 管排壁面温度, T_g — 燃气温度, C_0 — 黑体的辐射系数, F — 总辐射交换因数, 它是衡量辐射传热能力大小的标志, 可由表查得, A_{ef} — 燃气对管排的有效辐射面积

1.4 后排管肋片换热计算

由于后排燃气的温度降低, 换热能力减弱, 为了提高后排管的换热能力, 一般在后排管加装肋片。对于有肋片的换热管, 其换热量由下式计算:

$$Q_B = A(T_i - T_w) \eta_B Z$$

η_B 的计算与前排管一样, 肋效率 Z 由等厚圆肋片效率公式计算:

$$Z = \frac{2r_0}{m(r_e^2 - r_0^2)} \times$$

$$\frac{I_1(mr_e) K_1(mr_0) - I_1(mr_0) K_1(mr_e)}{I_0(mr_0) K_1(mr_e) + I_1(mr_e) K_1(mr_0)}$$

其中: $I_i(x), K_i(x)$ 分别为 i 阶第一、二类贝

塞尔函数, r_o, r_e 为肋片内外圆半径, $m = \sqrt{\frac{2l_b}{W}}$, W 为肋片厚度, λ 为壁面导热系数

2 计算结果及分析

根据前述的计算方法, 编制了热气机外燃系统换热计算程序, 程序框图如图 2 所示, 并分别计算了燃料与空气和液氧燃烧两种情形的换热过程, 计算结果如下。

2.1 燃用空气和液氧两种情形下额定工况计算对比

计算条件如下: 燃用空气时, 燃油流量为 25 kg/h, 过量空气系数为 1.2; 燃用液氧时, 氧流量为 75.235 kg/h, 燃油流量为 20.089

kg/h, 引射比 0.25, 计算结果如表 1 所示

由计算过程和计算结果发现, 混合气体的燃氧比 (燃用液氧时还有引射比) 对燃气温度影响很大, 燃用液氧时之所以要采用 CGR 技术, 就是因为燃油与纯氧燃烧温度太高 (可高达 4000 K), 热头材料无法承受, 因而要用氧气引射一部分燃气再循环, 使得最终燃气温度维持在 2000 K 左右, 因此适当控制过量空气系数和引射比是控制燃气温度的重要手段。由计算结果还可发现, 燃用液氧时的辐射换热比燃用空气时大得多, 这是因为空气中含有大量的氮气, 而氮气是双原子分子, 无辐射能力; 计算中发现前排的换热系数比后排大, 但由于后排加装了肋片, 换热量有可能反而后排的大。

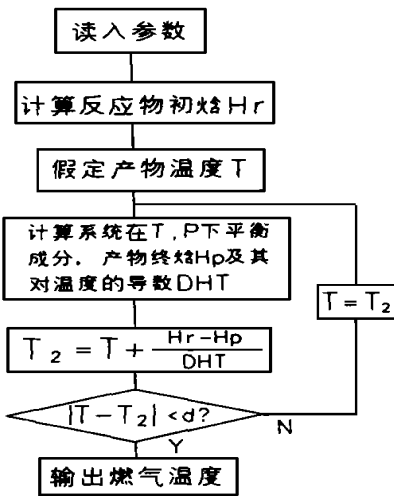


图 1 燃气温度计算流程图

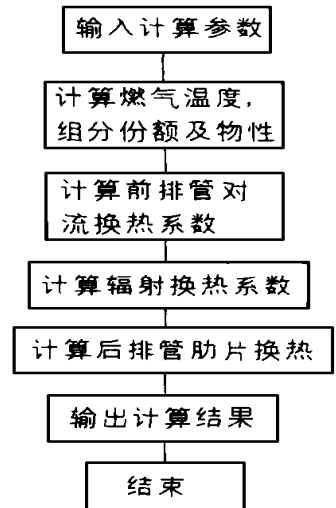


图 2 外燃系统换热计算流程图

表 1 两种情形的计算结果对比

项目	燃气温度 (K)	前排对流换热系数 (W/(m ² ·K))	前排辐射换热系数 (W/(m ² ·K))	前排总换热系数 (W/(m ² ·K))	前排换热量 (kW)	后排换热量 (kW)	总换热量 (kW)
燃用空气	2002.3	246.1	45.3	291.3	99.4	154.5	253.9
燃用液氧	2090.8	119.6	368.6	476.2	111.4	102.1	213.5

2.2 各种因素对外燃系统性能影响分析

2.2.1 引射比、氧燃流量比对燃气温度的影响

不同的引射比对燃气温度影响的计算结果见表 2。由表可知,引射比增大(引射燃气

量减少),燃气温度增大,这是由于反应氧浓度增加的缘故。氧燃流量比对燃气温度影响的计算结果见表 3,随着氧燃比增大,燃气温度下降,这说明过量氧气系数大于 1,燃烧在稀限内进行。

表 2 引射比对燃气温度的影响

R_j	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29
T_g	1986.8	2019.0	2053.5	2090.8	2130.9	2174.3	2221.6	2273.2

表 3 氧燃比对燃气温度的影响

R_{of}	3.25	3.5	4.0	4.25
T_g	2148.4	2142.8	2138.5	2133.7

表中: T_g (K) 为燃气温度, T_{FC} ($W/(m^2 \cdot K)$) 为前排对流换热系数, T_{FR} ($W/(m^2 \cdot K)$) 为前排辐射换热系数, Q_F (kW) 为前排总换热量, Q_B (kW) 为后排总换热量。

2.2.2 燃气温度对换热的影响

对应于不同的氧燃比,燃气温度不同,在不同的燃气温度下计算了整个外燃系统的换热情况,计算结果如表 4 所示。

表 4 燃气温度对换热的影响

T_g	2133.7	2138.5	2142.8	2148.4
T_{FC}	119.9	116.1	115.3	111.0
T_{FR}	359.6	377.1	390.3	395.8
Q_F	112.4	120.9	128.1	138.2
Q_B	106.1	101.3	95.8	93.3

由计算结果可知,前排的对流换热系数随温度的升高略有下降,但辐射换热系数却增大很多,因而总的换热系数是增加的,前排的总换热量也增加,而后排的换热量却减小。

2.2.3 换热管壁面温度对换热的影响

针对不同的管壁温度,分别计算了外燃系统的换热情况,管壁温度对前排对流换热系数是没有影响的,计算结果示于表 5。

随着管壁温度 T_w ($^{\circ}C$) 的提高,虽然换热系数有所增加,但由于燃气与管壁之间的温差减小,前后排的换热量都减小了。

表 5 管壁温度对换热的影响

T_w	640	660	680	700	720	740	760	780
T_{FR}	328.7	333.9	339.2	344.6	350.1	355.8	361.5	367.4
Q_F	116.8	115.9	114.8	113.9	112.9	111.9	110.9	109.8
Q_B	97.6	98.4	99.2	100.0	100.8	101.6	102.5	103.4

3 结 论

由本文的计算工作可以得到如下结论:

(1) 由于热气机外燃系统涉及的因素很

多,过程比较复杂,因而需使用计算机进行详细计算,实践证明这是一种行之有效的方法。

(2) 外燃系统换热计算的关键是燃气温度和组分的计算,而温度计算的准确性与平

衡组分种类的选择有很大关系。根据燃气温度范围,一般燃用空气时选择 H_2O 、 N_2 、 H_2 、 O_2 、 CO 、 NO 、 O_3 、 H_2O 、 CO_2 、 N_2 、 Ar 等 12 种平衡成分,而燃用液氧时本文选用 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 H_2 、 O_2 、 O 、 H 、 OH 等 8 种平衡产物,计算表明这种处理方法是合适的。

(3) 由于热气机外燃系统的燃气温度较高,且燃气中非透明的三原子分子含量较大,一般必须考虑辐射的影响,特别是在燃用液氧的时候

参考文献

1 金国栋. 内燃机燃烧学. 华中理工大学出版社, 1991

2 G 沃克. 热气机. 机械工业出版社, 1987

3 钱国柱. 热气机. 国防工业出版社, 1982

4 机械工程手册(2). 机械工业出版社, 1982

5 穆俊主编. 管式加热炉. 华中理工大学出版社, 1990

作者简介 沈建平,男,29岁,内燃机专业工学博士,现为中国船舶工业总公司第七研究院第七一一研究所博士后研究人员。从事 Stirling 发动机的研究和开发工作。科研方向是内燃机气缸及进气道内气体湍流运动的测量和数值模拟; Stirling 发动机燃烧及换热、性能分析计算、氧引射及 Stirling 发动机系统仿真等。(通信处:上海市青海路 105 弄 711 研究所热气机工程研究中心,200041)

瑞典增压流化床联合循环发电技术的发展现状 = (**The Present Status of Development of Swedish Power Generation Technology Involving the Use of a Pressurized Fluidized Bed Combined Cycle Unit**) [刊, 中] / Li Daji (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(1). 1- 5

An on the spot survey of Swedish power generation technology involving the use of a pressurized fluidized bed combined cycle unit (PFBC-CC) was made in late April 1996 by a Chinese Delegation of Industrial Science & Technology. As a result, a comprehensive understanding has been gained of the research history and present status of the above-cited technology. This paper gives a brief description of the three types of PFBC plants of Swedish ABB Carbon Co. in respect of its preliminary test, intermediary test, commercial demonstration and application. **Key words** pressurized fluidized bed, combined cycle, Sweden, development

Stirling 发动机燃烧及换热分析 = (**Analysis of a Stirling Engine Combustion and Heat Exchange**) [刊, 中] / Shen Jianping, Jin Donghan, Gu Genxiang (No. 711 Research Institute under the China State Shipbuilding Corp.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(1). 6- 10

On the basis of a calculation of hydrocarbon fuel combustion chemical equilibrium reaction obtained are the temperature and component ingredients of the combustion products. Following this the combustion gas physical properties were calculated and based on this the convection heat exchange factor, radiation heat exchange factor and rear row heat exchange pipe rib heat transfer of a heat engine outer combustion system heating pipe were also calculated. A contrast computation is conducted of the two combustion conditions, air combustion and liquid oxygen combustion. Also computed are the various factors which have an influence on combustion with an analysis and discussion performed for the calculation results. The valuable conclusions obtained can serve as a guide for the structural design of the heat engine outer combustion system. **Key words** heat engine, heat exchange factor, combustion, chemical equilibrium

给水泵液力调速系统的特性及其非线性改善分析 = (**Analysis of the Characteristics of a Feedwater Pump Hydraulic Speed Governing System and Its Non-linear Improvement**) [刊, 中] / Wang Liwen (China National Civil Aviation Institute), Yan Guojun, Zhu Ruibin, Yang Huipu (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 11- 14

After an analysis of the regulating characteristics of the fluid coupling feedwater pump speed regulating system this paper gives a brief account of the principle of a variable function generator used for improving the serious nonlinearity of regulating characteristics and also the software and hardware design method. By way of an experimental analysis a scoop pipe-drive method is proposed for the improvement of a high-power variable speed fluid coupling. **Key words** variable speed fluid coupling, feedwater pump, nonlinearity

凝汽式汽轮机乏汽凝汽器强化的研究 = (**A Study of the Exhaust Steam Condenser Heat Transfer Enhancement of a Condensing Steam Turbine**) [刊, 中] / Lu Yingsheng, Zhuang Lixian, Deng Xianbe, Chen Guanghui, Chen Mulin (South China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 15- 18

On the basis of an experimental study and analysis on the intensification mechanism of a high-efficiency heat transfer element (transversally corrugated tube) and its heat transfer and fluid mechanics conducted is the industrial application-oriented performance test of a 1500 kW condensing turbine condenser comprising glossy tubes and transversally corrugated tubes. The application prospects of the condensers made of transversally corrugated tubes are also given. **Key words** steam turbine, condenser, transversally corrugated tube, heat transfer intensification

煤粉气流火焰稳定性条件分析 = (**Analysis of Pulverized Coal Current Flow Flame Stability Conditions**) [刊, 中] / Ma Xiaoqian (South China University of Science & Technology), Jin Sijun, Si Xuefeng, Qian Ren-