

STIG 循环余热锅炉回热限制分析*

周伏秋 王克光 严家驹

(哈尔滨工业大学)

[摘要] 为分析注蒸汽燃气轮机(STIG)循环余热锅炉回热限制,本文对 STIG 循环在 1000~1300℃的温域、8~42 的压比范围进行了仿真计算。计算表明:余热锅炉首先达到哪一种回热限制,取决于具体的给定条件;它受回注蒸汽温度的影响,并且与最小允许节点温差值的选择有关。

关键词 余热锅炉 回热限制 模拟计算 STIG 循环

分类号 KT229.929

1 引言

STIG 循环作为一种特殊的回热循环,其基本思想是:利用第二工质“水/蒸汽”回收透平排气中的余热;蒸汽注入燃烧室和第一工质“空气/燃气”混合形成混合燃气,从而获得较优越的循环性能,热效率和比功均有较大幅度的提高。

STIG 循环的性能在很大程度上取决于余热锅炉产生的蒸汽数量和质量。当其它条件一定,余热锅炉达到回热极限时,STIG 循环具有最佳的循环性能。关于余热锅炉的回热限制,已有过一些讨论^[1,2,3],但迄今没有一个明确的结论。有鉴于此,本文在 1000~1300℃的温域、8~42 的压比范围内对 STIG 循环进行了仿真计算。

2 余热锅炉回热限制分析

余热锅炉中冷、热流体典型的温度变化如图 2 所示,它定性地表明:节点温差(最小传热温差)发生在蒸发开始处。余热锅炉的热回收受到两个方面的技术限制。

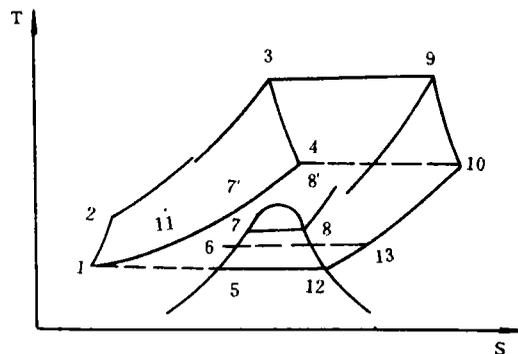


图1 注蒸汽燃气轮机循环温焓图

* 本文曾于 1992 年 11 月在北京召开的中国工程热物理学会首届青年学术会议上宣读

收稿日期 1993 04 07

本文联系人 周伏秋 男 28 博士生 150006 哈尔滨工业大学动力系 230 教研室

2.1 节点温差限制

余热锅炉节点温差 $\Delta T_p = T_{7'} - T_7$, 它基本上反映了余热锅炉内传热不可逆性的程度。从热力学第二定律的角度分析, ΔT_p 越小, 传热不可逆性也越小, 透平排气中的余热则能得到更为有效的利用。极限情形为 $\Delta T_p = 0$ 。但是, 从余热锅炉设计的技术与经济性考虑, ΔT_p 不可能取零值, 需接受一定的限制, 即

$$\Delta T_p \geq \Delta T_{p, \min} \quad (1)$$

其中 $\Delta T_{p, \min}$ 为节点温差的最小允许值。

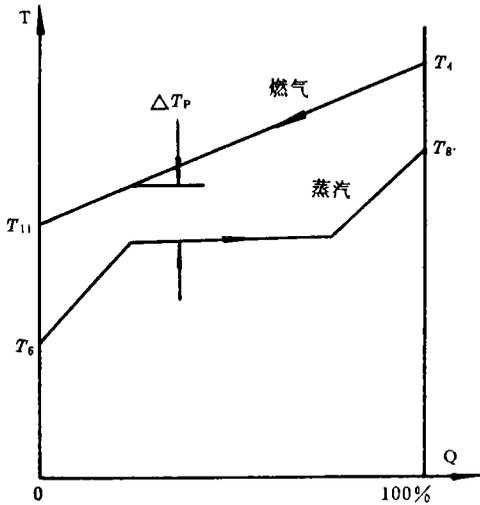


图 2 余热锅炉传热流程示意图

2.2 排气温度限制

为抑制结露产生的酸性腐蚀, 对燃气轮机终排气温度需作必要的限制

$$T_{11} \geq T_{pq} \quad (2)$$

其中 T_{pq} 为允许的最小排气温度。

考虑节点温差, 有如下的热平衡关系式:

$$\begin{aligned} (1 + X + f)[h(T_4) - h(T_7)] \\ = X[h_s(T_{8'}, p_s) - h_w(T_6, p_s)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中 X, f 分别代表注蒸汽比和燃料空气比。当达到节点临界状态时, 有

$$\Delta T_p = \Delta T_{p, \min} = T_{7'} - T_7$$

代入式(3), 可得相应于节点温差限制的效率最佳注蒸汽比

$$\begin{aligned} X_v^{(1)} = \{ (1 + f)[h(T_4) - h(T_7 + \Delta T_{p, \min})] \\ / \{ [h_s(T_{8'}, p_s) - h_w(T_6, p_s)] - [h(T_4) \\ - h(T_7 + \Delta T_{p, \min})] \} \} \quad (4) \end{aligned}$$

余热锅炉总体热平衡

$$\begin{aligned} (1 + X + f)[h(T_4) - h(T_{11})] \\ = X[h_s(T_{8'}, p_s) - h_w(T_6, p_s)] \quad (5) \end{aligned}$$

当达到回热临界状态时, 有

$$T_{11} = T_{pq}$$

代入式(5), 可得相应于极限排气温度的效率最佳注蒸汽比

$$\begin{aligned} X_v^{(2)} = \{ (1 + f)[h(T_4) - h(T_{pq})] \\ / \{ [h_s(T_{8'}, p_s) - h_w(T_6, p_s)] - [h(T_4) \\ - h(T_{pq})] \} \} \quad (6) \end{aligned}$$

实际运行的余热锅炉, 必须同时满足节点温差限制和排气温度的限制。故 STIG 循环的效率最佳注蒸汽比 X , 为 $X_v^{(1)}, X_v^{(2)}$ 两者之一, 它取决于余热锅炉首先达到哪一个限制。

3 计算结果

在 $T_3 = 1000 \sim 1300 \text{ C}$ 的温域、 $\pi = 8 \sim 42$ 的压比范围内对 STIG 循环进行仿真计算。计算条件: $\Delta T_{p, \min} = 20 \text{ C}, T_{pq} = 150 \text{ C}, p_s - p_2 = 0.2 \text{ MPa}, T_{8'} = 350 \text{ C}, T_w = 20 \text{ C}$ 。压气机进口空气状态取 101 325 Pa 和 20 C。燃烧室压损率 $\epsilon_{b3} = 0.05$; 余热锅炉压损率 $\epsilon_{G6} = 0.03$ 。

3.1 初温、压比及注蒸汽比对 $\Delta T_p, T_{11}$ 的影响(图 3)

由图 3 可知, 在初温 T_3 、压比 π 一定时, 随着注蒸汽比 X 的增加, 节点温差 ΔT_p 、排气温度 T_{11} ($T_{11} = T_7$) 均逐渐降低。这是因为当 X 增加时, 余热锅炉回收的热量渐增, $\Delta T_p, T_{11}$ 自然下降。当压比较低时, 余热锅炉燃气

侧入口温度较高,当达到较大的注蒸汽比时,余热锅炉才达到其回热限制,并且首先是达到排气温度限制。例如当 $T_3 = 1100\text{C}$, $\pi = 12, 16, 20$ 时,余热锅炉均首先达到极限排气温度,此时相应的最佳注蒸汽比 X ,分别为 0.227、0.188、0.163,对应的节点温差 ΔT_p 分别为 65 $^{\circ}\text{C}$ 、47 $^{\circ}\text{C}$ 、31.1 $^{\circ}\text{C}$ 。当压比较高时,余热锅炉燃气侧入口温度较低,可供余热锅炉回收的热量减少,余热锅炉在较小的注蒸汽

比时即达到回热限制,而且往往是首先达到节点温差限制。例如,当 $T_3 = 1000\text{C}$ 、1100 $^{\circ}\text{C}$ 、1200 $^{\circ}\text{C}$ 、1300 $^{\circ}\text{C}$,相应的压比 $\pi = 20$ 、24、32、42(此时每一个压比均接近各自 T_3 下的效率最佳压比)时,余热锅炉都首先达到节点温差限制,此时对应的排气温度分别为 158.1 $^{\circ}\text{C}$ 、152.2 $^{\circ}\text{C}$ 、152.5 $^{\circ}\text{C}$ 、151.2 $^{\circ}\text{C}$,均已接近余热锅炉的极限排气温度。

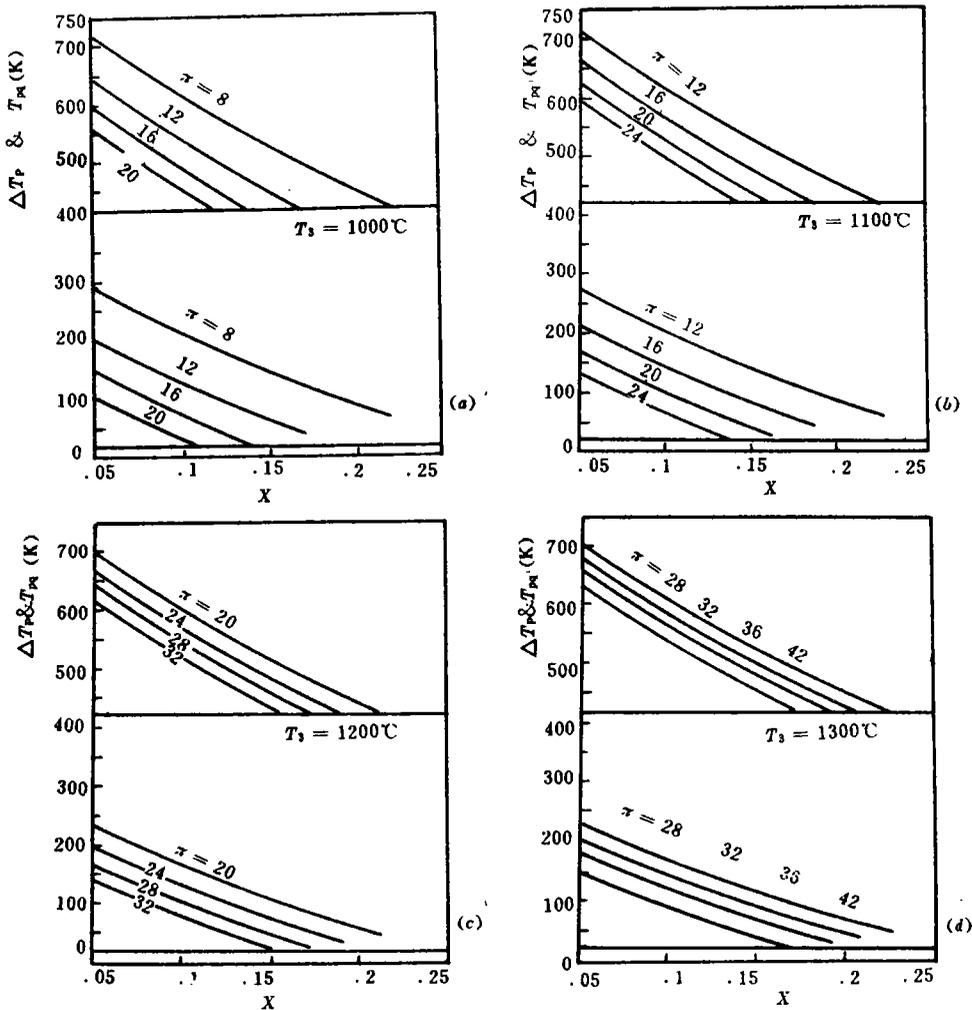


图3 $\Delta T_p, T_m$ 随 T_3, π 及 X 的变化

3.2 注蒸汽温度 T_8' 的影响(图 4)

图 4 表示 $T_3 = 1200^\circ\text{C}$ 、 $\pi = 32$, 其它条件不变时, ΔT_p 、 T_{11} 随注蒸汽温度 T_8' 和注蒸汽比 X 的变化。

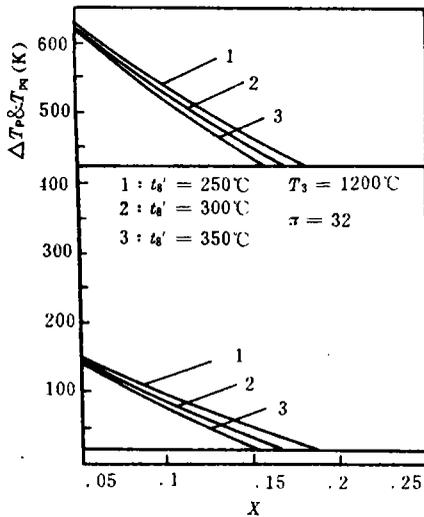


图 4 回注蒸汽温度的影响

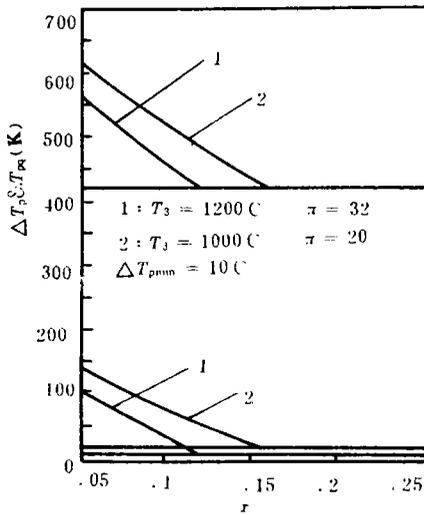


图 5 最小允许节点温差选择的影响

曲线 1 对应 $T_8' = 250^\circ\text{C}$ 的情形, 当 $X_0 = 0.181$ 时, 余热锅炉首先达到其排气温度限制, 对应的 $\Delta T_p = 28.8^\circ\text{C}$ 。曲线 2 对应 $T_8' = 300^\circ\text{C}$ 时的情形, 此时余热锅炉仍然首先达到排气温度限制, 对应的 $X_0 = 0.168$, ΔT_p

$= 23.3^\circ\text{C}$, 此时 ΔT_p 已较接近其最小允许值 $\Delta T_{p, min}$ 。 $T_8' = 350^\circ\text{C}$ 时的情形如曲线 3 所示。当 $X_0 = 0.157$ 时, 余热锅炉首先达到节点温差限制, 此时对应的排气温度 $T_{11} = 152.5^\circ\text{C}$, 接近其极限排气温度。可见, 余热锅炉首先达到哪一种回热限制, 不仅决定于初温 T_3 、压比 π 和注蒸汽比 X , 同时还受回注蒸汽温度 T_8' 的影响。

3.3 $\Delta T_{p, min}$ 选择的影响(图 5)

最小节点温差 $\Delta T_{p, min}$ 一般是根据技术经济要求由余热锅炉设计者人为地选定。余热锅炉首先达到哪一种回热限制, 与 $\Delta T_{p, min}$ 的选择有关。由图 5 看出: 曲线 1 对应 $T_3 = 1000^\circ\text{C}$ 、 $\pi = 20$ 、 $\Delta T_{p, min} = 10^\circ\text{C}$ 的情形, 与图 3(a) $\Delta T_{p, min} = 20^\circ\text{C}$ 的情形相比, 这里余热锅炉在 $X_0 = 0.12$ 时首先达到排气温度限制, 对应的节点温差 $\Delta T_p = 11.8^\circ\text{C} > 10^\circ\text{C}$ 。曲线 2 与图 3(c) 相对应, 表示 $T_3 = 1200^\circ\text{C}$ 、 $\pi = 32$ 、 $\Delta T_p = 10^\circ\text{C}$ 时的情形。与图 3(c) 余热锅炉首先达到节点温差限制的情形相反, 此时余热锅炉在 $X_0 = 0.158$ 时首先达到排气温度限制, 对应的 $\Delta T_p = 18^\circ\text{C} > \Delta T_{p, min}$ 。由此可见, 余热锅炉首先达到哪一种回热限制还与 $\Delta T_{p, min}$ 的取值有关。

4 结论

以分析余热锅炉回热限制为目标, 本文对 STIG 系统在 $T_3 = 1000 \sim 1300^\circ\text{C}$ 的温域和 $\pi = 8 \sim 42$ 的压比范围内进行了仿真计算。计算结果表明:

1. 余热锅炉首先达到哪一种回热限制与给定条件有关, 在不同的给定条件下两种回热限制均有可能达到。
2. 初温一定、压比较低时, 余热锅炉首先达到的是排气温度限制; 当压比较高时, 余热锅炉往往首先达到节点温差限制。

3. 余热锅炉首先达到哪一种回热限制, 还受到回注蒸汽温度的影响, 并与 $\Delta T_{p, \min}$ 的取值有关。

参 考 文 献

1 Fraize W E, Kinney C. Effects of steam injection on the

performance of gas turbines power cycles. Journal of Engineering for Power, 1979, 101(4)

2 Larson E D, Williams R H. Steam-injected gas turbines. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1989, 109(1)

3 蔡香贤. 余热锅炉节点温差及其对联合循环性能的影响. 工程热物理论, 1983, 4(3) (李乡复 编辑)

NK 系列燃气轮机现状

据《Gas Turbine World》1993 年 5—6 月号报导: 俄罗斯萨马拉科学和生产联合体“劳动”(下面简称“劳动”)从 60 年代初到现在在将航空发动机改装成工业用的燃气轮机方面取得了很大的成就, 产品被广泛用于驱动压缩机和发电机, 它的型号之前都冠以其总设计师尼古拉·库兹尼佐夫的名字的字首 NK, 其中 NK-16PT 和 NK-17 已累计运行 800 万小时以上。

NK 系列燃气轮机有十余种型号(见表), 其简单循环热效率已由早期 NK-16PT 的 29% 提高到 1994 年前将完成发展计划的 NK-38PT 的 38%, 又如 NK-14PT 是 NK-12PT 的替代产品, 它有 45% 的零件和 NK-12PT 通用, 但其效率由 NK-12PT 的 26.1% 提高到 32%, 功率由 6.3 MW 提高到 8.0 MW。

• 不断提高对于低 NO_x 的要求

目前 NK-36PT 和 NK-37 的排出物是按俄罗斯的国家规定 $150 \mu g NO_x / m^3$ 设计的, 但为了满足世界市场的要求, “劳动”正在把对燃气轮机排气的要求提到更高的标准 $50 \mu g NO_x / m^3$, 由“劳动”已有的经验指出, 将来无需喷蒸汽或水就可满足此要求。

• 大力发展烧双燃料的燃气轮机

为满足国内外对烧双燃料的要求, 即既能烧柴油又能烧天然气, “劳动”用相当多的发展力量从事这方面的工作, NK-37 和 NK-39 都被设计成可烧双燃料。

• 动力涡轮转速的级数

“劳动”将同一型号原型机在为供驱动压缩机或发电机的不同用途的改装中, 其动力涡轮的转速和级数经常是不同的, 前者转速高级数较少, 后者转速是 3000r/min(50Hz), 级数较多。

俄罗斯 NK 系列燃气轮机

原型机型式	涡轮螺旋桨发动机	涡轮风扇发动机		涡轮风扇发动机		螺旋桨风扇发动机			涡轮风扇发动机
原型机型号	NK-12	NK-321		NK-8		NK-93			NK-86
改型机型号	NK-12PT	NK-36PT	NK-37	NK-16PT	NK-17	NK-38PT	NK-39PT	NK-40PT	NK-91
用途	驱动压缩机	驱动压缩机	驱动发电机	驱动压缩机	驱动发电机	驱动压缩机	驱动发电机	驱动压缩机	驱动发电机
功率	6.3 MW	25 MW		16 MW		16 MW		10 MW	20 MW
首台使用日期	1964 年	1994 年初		1982 年		1995 年			
已交货使用(台)	1600 多台			600 多台					
目前在运行(台)	800 多台			427 台					
效率	26.1%	37%		29%		38%			32%
动力涡轮级数	1	2	4	1	2	2	5	3	

(谈增祥 供稿)

CONTENTS

- (130) **Cogeneration Technology in England and Europe-- the Second in a Series of Reports Concerning Cogeneration**Qiang Guofang(*Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute*)

Through a brief, comprehensive and systematic description of the current status, state-of-the-art, cost effectiveness, development prospects and management formats of CHP (combined heat and power) engineering in England this paper attempts to arouse the keen interest in cogeneration technology of the broad ranks of power engineering workers as well as other related organizations and departments and thereby induce them to apply ever greater efforts in striving for the further advancement of this power generation cycle. **Key words:** *combined heat and power, district heating, independent energy producers*

- (137) **A New Outlook on the Study of Power Plant Cycles and Their Development Trends** Yang Yushen, Zhou Fuqiu, Yu Qing(*Harbin Institute of Technology*)

This paper briefly describes the basic outward features of and recent advances in the research of high capacity power plant cycles. A concise presentation is also given of the future development trends of such cycles. **Key words:** *combined cycle, steam injected gas turbine cycle, coal fired PFBC combines cycle, gasification combined cycle, HAT cycle*

- (143) **Some Research Findings Concerning the Surge Characteristics of Axial Compressors** Wu Yangjie(*Wuxi Division of Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute*)

The author has summed up the experimental test results of several types of compressors, presenting some research findings concerning surge boundaries. The use of these findings can not only be conducive to reducing the number of times of tests but also serves a useful purpose during the calculation of the related parameters on surge boundaries. **Key words:** *compressor, surge characteristics*

- (146) **An Analysis of the Regeneration Restriction of STIG Cycle Heat Recovery Boilers** Zhou Fuqiu, Wang Keguang, Yan Jialu (*Harbin Institute of Technology*)

To make an analysis of the regeneration restriction of heat recovery boilers for steam injected gas turbine cycles, a simulation calculation has been performed of a STIG cycle in the temperature range of 1000~3000 C and pressure ratio range of 8~42. The results of the said calculation show that the type of regeneration restriction which took place on the heat recovery boiler will first of all depend on the given specific conditions and is subject to the influence of injected steam temperature. In addition, the regeneration restriction has also been found to be related to the selected value of the minimally allowable pinch-point temperature difference. **Key words:**

() *heat recovery boiler, regeneration restriction, simulation calculation, STIG cycle*

(151) **A Study on the Combustion Stability of Utility Boilers** Chen Gang, Li Fekin, et al. (*Central China Polytechnical University*)

This paper gives a brief description of the theory of boiler combustion stability and presents several types of combustion stabilizing devices, among others, boundary jet-flow bluff-body combustion stabilizer, central return-flow combustion stabilizing device, inward/outward duplex return flow combustion stabilizer, intersection type high concentration pulverized coal burner. Their practical applications have shown that significant economic benefits have been attained as a result of their combustion stabilizing effect due to degreasing and also their enhanced combustion efficiency. **Key words:** *stable combustion, combustion theory, boiler*

(155) **An Exploratory study on the Development of Circulating Fluidized Bed Boilers** Zhang Zidong, Wu Wenyuan, Bao Yilin, Bei Rushan, Zhao Mingquan (*Power Engineering Department of the Harbin Institute of Technology*)

Circulating ratio, as an important design parameter of CFG boilers, exercises a significant influence on boiler design and operation. In this paper the authors deal with the dependence of the circulation ratio on the following factors: the selection of circulating materials, combustion efficiency, separation efficiency of separators, the arrangement of heating surfaces in a dense phase region, superheated steam temperature, etc. In addition, some helpful suggestions concerning the above are also presented. **Key words:** *circulating fluidized boiler, circulating ratio, low circulating ratio, circulating materials*

(159) **Jet-flow Device—a Useful Tool for Enhancing Circulation Water Velocity in Natural Circulation Hot Water Boilers** Zhu Qunyi, Zhang Peting, et al. (*Harbin Institute of Technology*)

Theoretical analysis and experimental study results are given of the performance of a jet-flow device employed in the circulating circuit of natural circulation hot water boiler. Presented in the paper is also a formula for calculating additional head ΔP of the said circuit after the installation of a straight-tube nozzle and a conical one. **Key words:** *hot water boiler, jet-flow device, straight-tube nozzle, conical nozzle*

(163) **A Mathematical Model for the Optimized Design of Heat Pipe Air Preheater of a Utility Boiler** Huang Xinyuan (*Power Engineering Department of Shandong Polytechnical University*)

This paper presents a mathematical model for the optimized design of the heat pipe air preheater of a utility boiler. The control condition of the preheater minimum tube wall temperature has been introduced into the constraint function vector. Some explanatory notes are given regarding the specific features of the method involving the use of optimization techniques during the design of the heat pipe air preheater. A specific calculation example is also presented. **Key words:** *utility boiler, heat pipe, air preheater, mathematical model*

(168) **A Study on the pressure Distribution in Headers of Gas-Liquid Two-Phase Flows in a Horizontal Parallel Tube System** Wu Dongyin (*Xi'an thermotechnical Institute*); Liu Zonghu (*Xi'an Communications University*)