

# 基于射线法超临界流体在拟临界点处热物性研究

赵 于, 毕勤成, 胡日查

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室 陕西 西安 710049)

摘 要: 在压力  $p = 22 \sim 25$  MPa, 管内质量流速  $G = 1\ 000 \sim 1\ 500$  kg/( $m^2 \cdot s$ ), 流体温度  $t = 200 \sim 420$  °C 参数范围内, 利用放射源( $Cs-137$ ) 释放出的单束伽马射线采用动态测量方法对垂直上升管内超临界流体物性进行了比较系统的实验研究。在实验的基础上, 针对射线本身灵敏度较高的特性, 得出了环境温度、试验段与放射源距离两个特征参数对流体射线计数率(Count Rate)的影响, 前者在较小的变化范围内对计数率影响不大, 而距离也反映出了能量衰减也按负指数规律变化。23 MPa 时质量流速为 1 000、1 500 kg/( $m^2 \cdot s$ ) 的两条曲线计数率随温度的变化规律十分相似, 数值与理论吻合度较好。23 与 25 MPa 下的测量结果表明, 压力对于伽马射线测量结果影响不大。

关 键 词: 超临界流体; 伽马射线密度计; 计数率; 放射源; 临界压力区

中图分类号: O359; O551 文献标识码: A

## 引 言

两相流体参数的测量是目前多相流领域的重点和难点, 其中截面含气率又是众多参数中一个极其重要的测量参数。目前, 国外认可度比较高的方法是利用伽马射线密度计测量截面含气率, 但测量工况基本上都集中在低压力、冷态、空气-水或者油水等, 涉及到高温、高压尤其是亚临界甚至超临界流体的测量, 而当前能收集的参考文献中尚无这方面的资料, 所以对于锅炉水冷壁中真正存在的流体—亚临界水-水蒸气, 参考价值及其有限。利用伽马射线密度计(单束射线)测量两相流体参数, 外国文献主要有 Chan 和 Banerje、Jiang 和 Rezkalla、chu 和 son、Hyun - Sik 和 Chang - Hya 等<sup>[1-4]</sup>。测量亚临界水-水蒸气相关参数的难点在于伽马射线能否准确区分出流动中的两相流体, 为此, 选择超临界水到超临界水蒸气这一过程作为研究对象。根据相关资料<sup>[5]</sup>, 超临界水在压力 22.12 MPa、温度 370 - 380 °C 之间存在一个大比热区。在此区域内, 流体物性

参数例如导热系数、粘度、密度等都有突变, 若伽马射线能测量并反映出流体物性急剧变化的现象, 则表明用射线法测量亚临界甚至超临界流体是可行的。由前所述, 用射线法测量两相流参数可参考的资料较少, 亚临界、超临界流体更是几乎没有, 而利用动态测量方法测量流动中的流体相关参数是目前国内外学者研究的一个热点, 所以本实验结果为以后使用在线测量方法测量亚临界甚至超临界流体奠定了理论和实验基础。

## 1 实验系统及实验原理

### 1.1 实验系统

本实验在西安交通大学高温高压气液两相流实验台上进行, 实验系统如图 1 所示。该高温高压实验系统的压力可达 40 MPa、流量 4.2 t/h、加热功率可达 1 MW<sup>[5]</sup>。

实验系统所用给水是由离子交换法制成的去离子水, 可保证受热管壁面不结垢、不腐蚀。给水由高位水箱经过滤器过滤后, 再由高压柱塞泵升压, 给水被升压后分为两路, 一路作为旁路系统, 满足流量和压力的调节; 另一路是实验主回路, 经质量流量计, 然后依次通过套管式换热器和电加热预热段, 将给水加热到设定参数后进入垂直上升试验段, 从试验段出来的流体经套管式换热器和冷凝器后回到高位水箱, 形成一个循环回路。试验段管子为不锈钢管, 材料为 1Cr18Ni9Ti, 尺寸为 25 mm × 2.5 mm, 有效长度为 3 000 mm<sup>[6]</sup>。

### 1.2 伽马射线测量系统

伽马射线测量系统由放射源、准直器、试验管段、探测器机信号处理模块等组成。超临界水在试验段的流向如图 2 所示, 从放射源( $Cs-137$ )射出的伽马射线经准直器形成单束射线并穿过试验管段。

收稿日期: 2012 - 10 - 15; 修订日期: 2012 - 11 - 08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 基金资助项目(2009CB219805)

作者简介: 赵 于(1982 -), 男, 陕西西安人, 西安交通大学博士研究生。

在试验管段另一端布置另一个与准直器同心的准直器,目的是保证探测器所接受射线也为单束射线。接收端准直器后布置一个探测器,探测器内包括光反射物质、闪烁体、光电信号转换器、探测器输出信号由电信号放大器放大并由计数器及定标器进行计数采集<sup>[7]</sup>。信号处理模块对输出信号进行采集、放大、筛选及计算显示。伽马射线测量系统如图 2 所示。

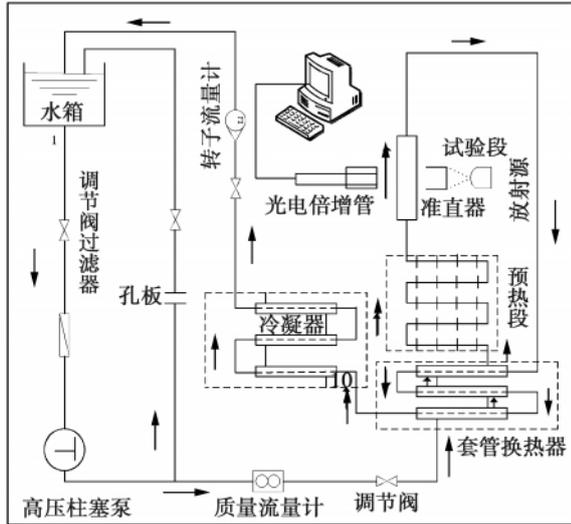


图 1 伽马射线密度计标定系统图

Fig. 1 Schematic diagram of a system for calibrating a  $\gamma$ -ray densitometer

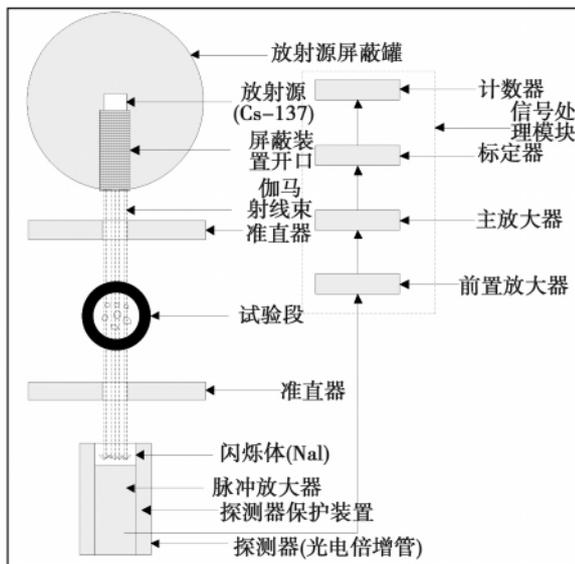


图 2 伽马射线测量系统图

Fig. 2 Diagram of a  $\gamma$ -ray measurement system

### 1.3 临界压力区内水的物性参数变化

超临界压力下,工质没有汽液两相共存的沸腾状态,当水的工作状态超过热力学临界点( $P_{cr} = 22 \text{ MPa}$ ,  $t_{cr} = 340 \text{ }^\circ\text{C}$ ),在一个很小的温度范围内,物性参数发生显著的变化。如图 3 和图 4 所示,在温度  $380 \sim 390^\circ\text{C}$  附近,当温度稍有增加,水的物性参数如密度值、动力粘度值、导热系数值明显降低,有些参数变化达数倍之多。对于超临界流体来说,当工质温度低于拟临界温度时为类似于水的流体;高于拟临界温度时为类似蒸汽的流体<sup>[5]</sup>。

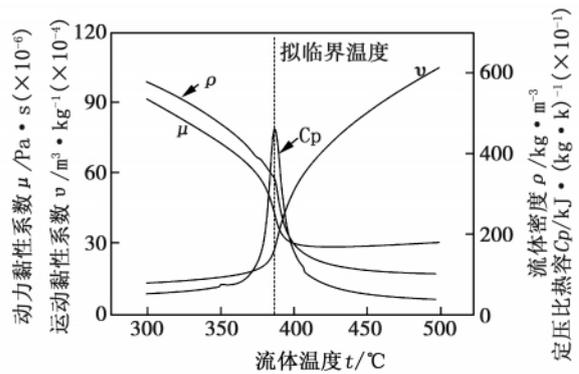


图 3 26 MPa 超临界水热物性图

Fig. 3 Chart showing the thermophysical properties of water at a supercritical pressure of 26 MPa

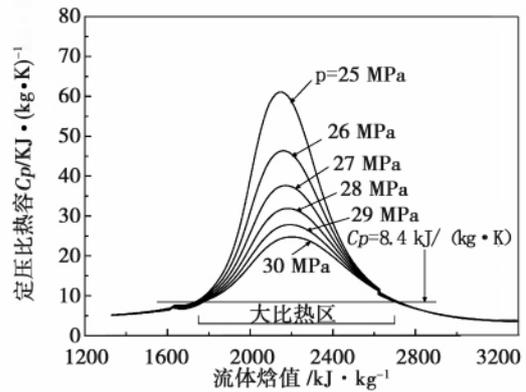


图 4 超临界水大比热区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of supercritical water in a region with a big specific heat

## 2 实验结果及分析

### 2.1 环境温度变化对计数率的影响

众所周知,放射源对温度变化比较敏感,为了消

除试验段加热对放射源的影响,在试验段的水平段和垂直段都包裹了保温棉以防止温度散失,只在垂直上升段留有40至50mm的开口,以便于射线测量。环境温度变化范围为10-12℃,压力分别为23和25MPa。通过对比图5(a)和(b)可以清楚的看到,在23和25MPa压力条件下,随着环境温度的逐渐升高。图5(a)中只有一个测量点达到了3100,其它各测量点基本上都稳定在正常的测量范围内;图5(b)图中各测量点分布的更加均匀。通过对比和分析实验结果可以得出,在较小的温度变化范围内,环境温度对伽马射线计数率影响不大,其中一个可能的原因是温度变化范围较小,不足以影响到放射源。所以,对于利用伽马射线测量高温高压的流体,只要控制好加热流体不对放射源有较大影响,环境温度对放射源的测量影响可以忽略不计。

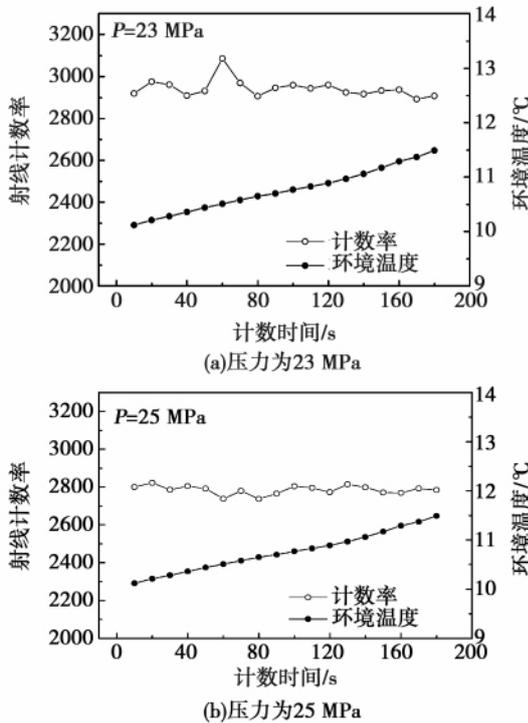


图5 23和25MPa环境温度变化与计数率关系  
Fig. 5 Chart showing relationship between a change of the ambient temperature at 23 and 25 MPa and the count rate

2.2 测量距离对计数率的影响

放射源向外释放射线,沿射线方向放射源强度呈负指数变化,即随着距离的增加,其强度依照负指数变化规律依次递减。试验中,在尽可能减少流体加热对放射源的影响和保证放射源强度的条件下,

将放射源和探测器距离垂直试验段的距离均保持在20mm,即放射源与探测器之间距离为40mm。将两者距离变化范围控制在45-55mm,从图6和图7中可以看到,随着放射源与探测器之间的距离逐渐增大,两图中射线计数率整体变化趋势与上述理论一致,都呈现负指数的变化规律,在47mm距离处,计数率都有一个突降,之后随着距离的增加,计数率依然逐渐减少,只是减少的幅度逐渐降低,整体变化趋势趋于平稳,所以,将距离控制在47mm以内,放射源强度均可以满足实验需要。通过分析图6和图7可以得出,试验中得出的放射源强度随距离变化趋势与理论分析得出的结果一致,在整个逐渐减小的过程中,存在突降点,突降点后变化趋势明显变缓。整个测量距离的变化,对于整体的测量有较大的影响,在进行放射源动态测量之前,必须多次确定测量距离,以减小距离对计数率测量的影响。

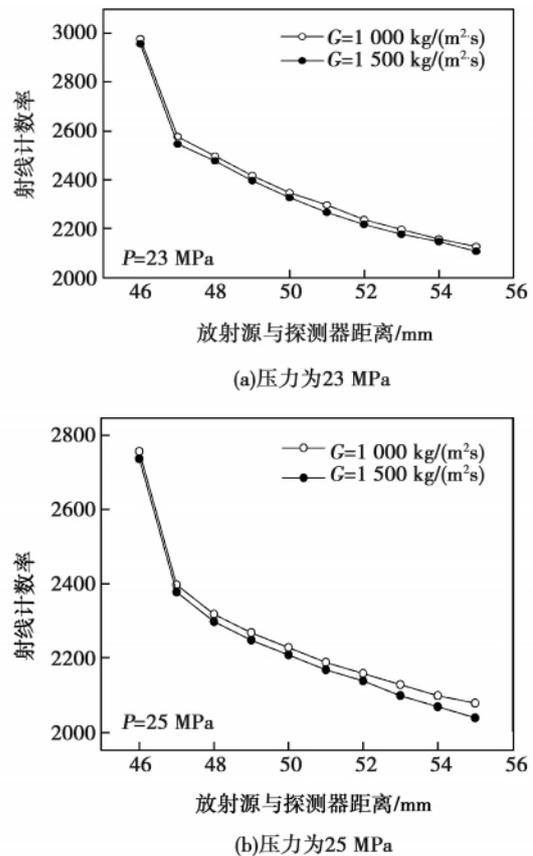


图6 23和25MPa放射源与探测器之间距离变化与计数率关系图  
Fig. 6 Chart showing relationship between a change of the distance of the radiation source from the detector at 25 MPa and the count rate

### 2.3 伽马射线在拟临界区测量结果及分析

由于本实验采用计数模式采集射线,为了准确反映出伽马射线与不同物质相互作用的关系,利用惯用参数——射线计数率表示不同状态下物质对伽马射线的吸收程度。

通过对流体临界压力区物性参数的讨论可以发现,在 374 °C (即临界点) 之前的温度区域,由于此时超临界流体为液态,密度值较大,对伽马射线本身具有较强的衰减作用,且温度值越低对应的密度值越大,对伽马射线的衰减作用就越强。图 7 ~ 图 10 中横坐标均为温度值,纵坐标分别为射线计数率和流体密度值。图 7 中 200 ~ 370 °C 对应的射线计数率值和图 8 中 200 ~ 370 °C 对应的密度值准确反映出了上述物理现象。在拟临界温度附近,超临界流体由类似水的液态转化为类似蒸汽的气态,且液态水的密度远大于气态蒸汽的密度,密度值将大幅降低。伽马射线测量的原理正是基于不同状态的物体对其强度衰减的影响,据此分析,由于气态物质对伽马射线衰减影响较低,故射线计数率值将大幅增加,图 7 中曲线准确反应出了这一超临界压力下超临界水密度突变的过程,也证实了利用伽马射线密度计在高温、高压条件下测量液体或气体的方法是可行的。

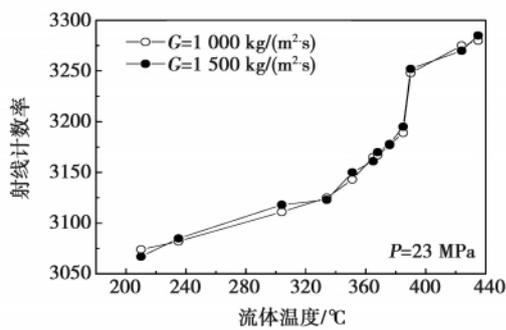


图 7 23 MPa 射线计数率与流体温度关系图  
Fig. 7 Chart showing relationship between the count rate of ray and the temperature of the fluid at 23 MPa

图 7 和图 9 给出了在 23 和 25 MPa 压力、不同质量流速条件下计数率随温度变化的规律。如图 7 所示,压力为 23 MPa 时质量流速为 1000、1500 kg/(m<sup>2</sup>·s) 的两条曲线计数率随温度的变化规律十分相似,而且对应数值也十分接近。压力为 25 MPa 时两条计数率曲线与 23 MPa 下的曲线相似,如图 9 所

示。这一现象说明不管是计数率数值还是计数率的变化规律均不受质量流速的影响。

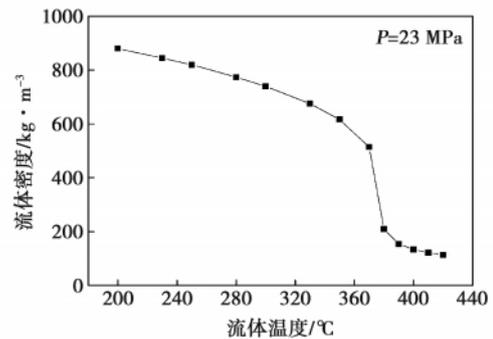


图 8 23 MPa 流体密度与流体温度关系图  
Fig. 8 Chart showing relationship between the density and the temperature of the fluid at 23 MPa

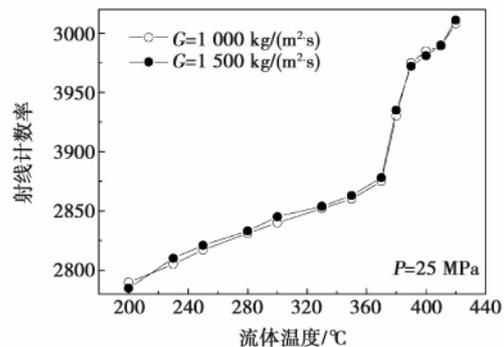


图 9 25 MPa 射线计数率与流体温度关系图  
Fig. 9 Chart showing relationship between the count rate of ray and the temperature of the fluid at 25 MPa

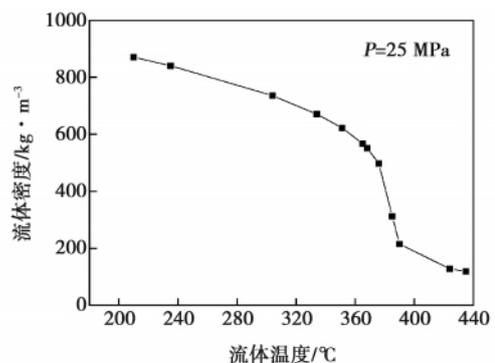


图 10 25 MPa 流体密度与温度关系图  
Fig. 10 Chart showing relationship between the density and the temperature of the fluid at 25 MPa

### 3 结 论

(1) 动态测量方法是比较客观反映流动流体实时状态的测量方法,目前国外应用较多。通过系统的测量得出环境温度以及放射源与探测器之间距对测量结果的影响,通过分析得出,在较小环境温度变化内,环境温度对测量的影响可以忽略不计;放射源与探测器之间距离对测量影响较大,计数率随距离呈现负指数的变化规律。

(2) 对于超临界流体,用实验证实了利用伽马射线密度计可以准确的测量出临界区域内流体热物性剧烈变化的过程,特别是流体密度突变的情况,为亚临界压力测量空泡份额奠定了一定的基础。

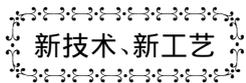
(3) 通过相同压力不同质量流速条件下计数率曲线的比对,得出了质量流速对于利用伽马射线测量出的计数率及计数率随温度变化规律影响很小。

#### 参考文献:

[1] Chan A M C ,Banerjee S. Design aspects of gamma densitometer for void fraction measurement in small scale two-phase flows [J]. Nuclear Instruments and Methods ,1981 ,190: 135.  
 [2] Jiang Y ,Rezkallah K S. An experimental study of the suitability of

using a gamma densitometer for void fraction measurements in gas-liquid flow in a small diameter tube [J]. Meas Sci Technol ,1993 , 4: 486.  
 [3] Chu I C ,Song C H. Development and performance evaluation of 32-channal gamma densitometer of flow pattern and void fraction in the downcomer of MIDAS test facility [ R ]. KAERI/TR-2045 / 2002 ,KAERI 2002.  
 [4] Hyun-Sik park ,Chang-Hwan Chung. Design and application of a single-beam gamma densitometer for void fraction measurement in a small diameter stainless steel pipe in a critical flow condition [J]. Nuclear Engineer and Design 2007 ,30 2 - 7.  
 [5] 王建国. 超临界锅炉水冷壁管低质量流速下的传热和阻力特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学 2010.  
 WANG Jian-guo. Investigation of the heat transfer and resistance characteristics of of the water wall tubes of a supercritical boiler at a low mass flow speed [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University 2010.  
 [6] 朱玉琴. 超临界锅炉汽液两相流分配特性和水动力特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学 2008.  
 ZHU Yu-qin. Study of the gas-liquid two phase flow distribution and hydrodynamic characteristics of a supercritical boiler [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University 2008.  
 [7] 郭海敏. 套管井地层参数测井 [M]. 北京: 石油工业出版社 2007.  
 GUO Hai-min. Sleeve-tube well stratum parameter measurement well [M]. Beijing. Petroleum Industry Press 2007.

( 辉 编辑)



## 美国洛代的 300 MW Flex30 联合循环装置

据《Gas Turbine World》2012 年 9 - 10 月刊报道 ,Lodi( 洛代) Energy Center 是在美国第一个运行 Siemens Flex 30 联合循环装置的公司。

LEC 的联合循环装置是围绕 1 台 208 MW 燃烧天然气的 STG-5000 燃气轮机( 具有蒸发空气进口冷却和干式低 NO<sub>x</sub> 燃烧室) 、1 台三压 Nooter Eriken 余热锅炉、选择催化还原和 CO 催化器和 1 台 100 MW SST-900RH 冷凝式汽轮机发电机组设计的。

该装置关键的性能如下:

- 输出功率

洛代装置基本负荷额定输出功率为 300 MW。

- 工作循环

被设计成中间到连续的工作 ,并且能够昼夜的循环。

- 升降率

在符合低于 50% 负荷的标准排放下 ,能够以 13.4 MW/min 的速率升高或降低输出功率并停机。

( 吉桂明 摘译)

基于射线法超临界流体在拟临界点处热物性研究 = **Study of the Thermophysical Characteristics of a Super-critical Fluid at the Quasi-critical Point Based on the Ray Method** [刊, 汉] ZHAO Yu, BI Qin-cheng, HU Ri-cha (National Key Laboratory on Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(3). -252 ~ 256

When  $P = 22$  to  $25$  MPa and the mass flow speed inside a tube  $G = 1\ 000$  to  $1\ 500$  kg/( $\text{m}^2\text{s}$ ) and the temperature of the fluid  $t = 200$  to  $420$  °C, experimentally studied in a comparatively systematical way were the physical characteristics of the fluid in a critical flow inside a vertical riser by making use of a single beam of gamma ray and adopting the dynamic measurement method. On the basis of the test and in the light of the characteristics of the radioactive ray having a relatively high sensitivity, the influence of two characteristic parameters, i. e. the ambient temperature and distance between the test section and the radioactive source, on the radioactive ray count rate of the fluid was obtained. The former has little influence on the count rate in a relatively small variation range and the distance also reflects that the energy attenuation will follow a variation law of a negative exponent. The variation laws of both count rate curves with the temperature when the mass flow speed is  $1\ 000$  kg/( $\text{m}^2\text{s}$ ) and  $1\ 500$  kg/( $\text{m}^2\text{s}$ ) respectively at  $23$  MPa are very similar and the values thus obtained from the curves are in very good agreement with the theoretical ones. The measurements at  $23$  MPa and  $25$  MPa respectively show that the pressure has little influence on the measurements by making use of the gamma ray. **Key words:** critical fluid, gamma ray densitometer, count rate, radioactive source, critical pressure zone

钢铁企业中低温烟气发电系统的比较和优化 = **Comparison and Optimization of Low Temperature Flue Gas Power Generation Systems in Iron and Steel Enterprises** [刊, 汉] ZHANG Li-hua, WU Li-jun, HU Hao-ran, GAO Xiu-jing (Thermal Energy and Environment Engineering Research Institute, Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 201804) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(3). -257 ~ 261

To make use of the flue gas waste heat at  $200$  to  $450$  °C from iron and steel works with a high efficiency, simulated and calculated were the thermal efficiency, exergy efficiency and power generation capacity of the working medium in unit mass of an organic Rankine cycle (ORC) and a steam-organic combined dual Rankine cycle (S-ORC) by using the software EES. Through a comparison of the performance of various power generation systems, the measures for optimizing the low temperature power generation systems were investigated. To further utilize the exhaust steam waste heat from the turbines of an ORC system, a cascade organic Rankine cycle was designed for heat sources at  $300$  °C and above. When the performance of various power generation systems is taken into account in a comprehensive way, it has been concluded that for flue gases at  $200$  to  $300$  °C, an ORC power generation system can be adopt-