

# 声学测温技术在燃煤炉膛温度场测量中的应用

周红生, 喻强, 张华, 王欢

(中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

**摘要:** 介绍了声学测温技术的国内外发展概况。对声学测温技术的原理、测温系统的基本构成进行了描述。分析了声学测量系统中声波收发单元、声波传播时间的测量、温度场重建等关键技术。讨论了燃煤炉膛内多相的烟气介质对声波传播的影响, 并分析了声波收发单元的布阵形式、温度场重建算法对炉膛温度场的测量结果带来的影响。最后, 对声学测温技术的发展提出了展望。

**关键词:** 声学测温; 炉膛; 声波收发单元; 温度场; 重建

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-06-0752-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.06.014

## The application of acoustic pyrometry in measuring the temperature field of the furnace consuming coal

ZHOU Hong-sheng, YU Qiang, ZHANG Hua, WANG Huan

(Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

**Abstract:** This paper deals with the development of acoustic pyrometry at home and abroad. It has a description of the principle of measuring temperature using acoustics pyrometry, as well as the basic structure of the temperature measuring system. In addition, this paper refers to some critical technology in the temperature measuring system, such as acoustic transceiver units, the measurement of the time of flight between two acoustic transceiver units, and the algorithm in reconstructing the temperature field. In this paper, it also has a discussion on the influence of multi-phase medium on the acoustic wave transmission, an analysis of lineup form of the acoustic transceiver units, and description of the impact on temperature field reconstruction. Finally, it foresees the development of acoustic measurement techniques.

**Key words:** acoustic pyrometry; furnace; acoustic transceiver unit; temperature field; reconstruction

## 1 引言

燃煤锅炉燃烧的基本要求在于建立和保持稳定的燃烧火焰。在典型的四角切圆燃烧锅炉中, 燃烧工况组织不合理造成的四角燃烧不均匀、火焰中心偏斜、火焰刷墙等是导致炉膛结焦、炉管爆破、炉膛灭火、炉膛爆炸等运行事故的重要原因<sup>[1]</sup>。因此, 为了预防潜在的危险, 必须进行有效的燃烧火焰监视和诊断。温度场的检测是进行燃烧诊断的一种重要手段。

常用的炉膛燃烧火焰温度测量方法可分为接触式和非接触式两种<sup>[2]</sup>。接触式温度测量方法包括: 热电偶温度计、膨胀式偶温度计、压力表温度计、黑体腔温度计和光纤测温法等, 它是利用测温传感器与被测对象直接接触, 在大多数情况下, 要使测

温元件和被测对象处于热平衡状态才能进行测量, 这将破坏被测量温场, 因此, 在某些场合下, 接触式测温方法的使用受到限制, 仅仅在实验室或者炉内温度不太高的区域使用, 难以实现温度场测量。非接触式温度测量方法包括: 光学法和声学法等。光学法包括辐射光谱法和激光光谱法两种。其中, 光学法中以激光技术为基础的测量方法是实验室火焰研究诊断的主要手段, 其不能适应大尺寸的炉内燃烧温度分布的测量; 辐射光谱法和声波检测法作为炉内燃烧温度检测的适用方法已经得到了证明。声学测温法在 20 世纪 80 年代中期得到发展, 并在 90 年代初被普遍采用<sup>[3]</sup>。声学测温技术利用烟气的物理特性记录可测温度, 不受辐射的影响, 而且测量是瞬时的, 没有温度漂移<sup>[4]</sup>。

## 2 声学测温技术的国内外发展概况

1873 年, Mayer 第一次提出了利用声学方法来确定气体介质的温度<sup>[3]</sup>;

20 世纪 70 年代初, 声学测温技术作为一门新

收稿日期: 2009-07-09; 修回日期: 2009-10-11

基金项目: 中国科学院声学研究所择优基金项目 2006ZY-01

作者简介: 周红生(1973-), 男, 高级工程师, 研究方向为超声应用。

通讯作者: 喻强, E-mail: yq\_salas@126.com

兴的科学技术正式被提出<sup>[3]</sup>;

20 世纪 80 年代, 声学测温技术得到深入的研究和发展, 主要奠基人是美国内华达大学的 John. A. Kleppe 教授<sup>[4-6]</sup>;

20 世纪 90 年代初期, 声学测温系统在国外被许多企业开发成了产品, 并实现了商业化<sup>[7]</sup>。被应用到燃煤、燃油火力发电厂、垃圾焚烧炉、化学用品回收锅炉、水泥回转窑等工业的热力过程控制中, 如美国 SEI 公司<sup>[4]</sup>、加拿大 CSI 集团公司。其中, SEI 的声学测温系统是一套非接触式、全自动化系统, 温度测量范围 0~1927℃, 测量误差小于 1.5%。声学测温系统在英国、德国、意大利、日本、韩国也受到极大的重视。

我国对声学测温技术的研究尚处于起步阶段。20 世纪 90 年代初, 东北大学邵富群教授及其领导的研究小组, 开始对锅炉炉膛温度场的声学测量方法进行研究, 从声源信号发生形式, 温度场重建算法到温度场测量实验系统的构成等均进行了一系列的研究和实验<sup>[7]</sup>。

华中科技大学的周怀春教授利用声学的方法对炉膛内的温度场、流场等进行了研究<sup>[2]</sup>。华北电力大学的安连锁、姜根山, 沈阳航空工业学院的田丰、吴英泽等学者也开展了相关的研究工作, 他们的研究工作也主要是优化温度场重建算法, 并在燃煤炉膛现场进行了相关的冷态实验<sup>[8]</sup>。

### 3 声学测温技术的原理

声学法测量气体温度的基本原理: 气体介质中声波的传播速度是该气体介质温度的函数, 同时与该气体的组分有关。在工程应用上, 通常可以认为气体的温度是声速的第一函数<sup>[9]</sup>, 用式(1)表示如下:

$$C = \sqrt{\frac{k \cdot R \cdot T}{M}} = Z \sqrt{T} \quad (1)$$

式中:  $C$  - 声波在气体介质中的传播速度;  
 $k$  - 气体的绝热指数, 与气体成分和状态有关;  
 $R$  - 气体常数,  $R = R_m / M$ ,  $R_m$  为通用气体常数;  
 $M$  - 气体分子质量;  
 $T$  - 气体的热力温度;  
 $Z$  - 对特定气体为一常数。

因此, 如果知道声波沿着某条路径的传播速度, 就可以求出该路径上的气体温度。图 1 是单路径声学测温原理示意图<sup>[3]</sup>。在某一个炉膛的两侧分别安装一个声波发射器和接收器。发射器发出一个声波脉冲, 该声波脉冲在高温烟气介质中传播, 并被另一侧的声波接收器检测。理想情况下, 声波的

传播路径是一条直线。

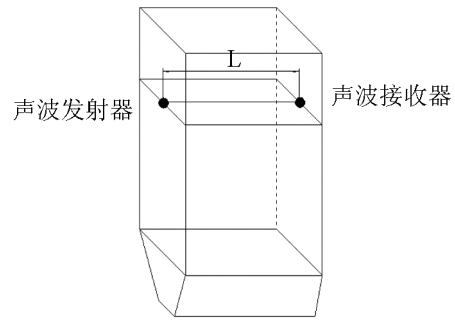


图 1 单路径声学测温原理示意图  
 Fig.1 The diagram of single path acoustic pyrometry principle

两个声波收发器之间的距离为已知, 通过测量声波在两个收发器之间的传播时间, 来确定声波传播路径上气体介质的平均速度:

$$C = L / \tau \quad (2)$$

式中:  $L$  为声波收发器之间的距离;

$\tau$  为声波在两声波收发器间的传播时间。

如果要提高声学测温系统的温度分辨率, 需要在锅炉的横截面上布置一定数量的声波收发传感器, 以获得多条声波传播路径<sup>[10]</sup>。图 2 是一个典型的温度场测量系统的声波收发传感器的布阵示意图, 它由对称分布的 8 个声波收发传感器(S1、S2...S8)组成。声波在不同侧的 2 个收发器之间进行传播, 可形成 24 条声波传播路径。在进行温度场的测量时, 在一个检测周期内, 顺序启闭各个声波收发器, 测量声波在每一条路径上的传播时间, 并按照一定的重建算法建立这个平面上的二维温度场分布<sup>[3]</sup>。

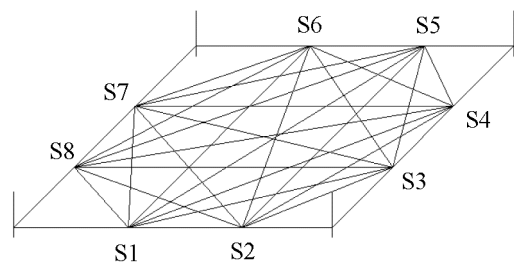


图 2 8 个声波收发器形成 24 条声波路径  
 Fig.2 The twenty-four acoustic wave paths formed by eight acoustic transceiver units

### 4 声学测温系统的基本构成

声学测温系统主要包括以下四部分<sup>[9]</sup>:

- (1) 电路系统: 电路系统由发射机、接收机、信号处理单元及通信单元组成;
- (2) 声波收发单元: 包括换能器单元和声波导管;

(3) 软件系统：软件系统由反演算法和图形绘制部分构成；

(4) 其他部分：包括上位计算机及其显示输出等外围设备。

声学测温装置的示意图如图 3 所示<sup>[9]</sup>。它的主要任务是测量声波在两个声波收发器之间的传播时间，经通讯系统，将测量到的声波传播时间数据送入系统进行处理，计算并反演炉膛温度场信息。

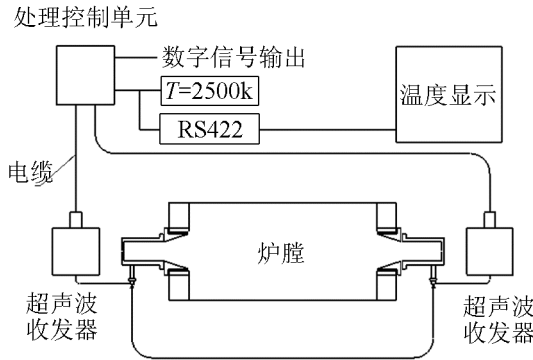


图 3 声学测温系统构成图  
Fig.3 Diagram of acoustic pyrometry system

### 5 燃煤炉膛温度场的声学测量系统的关键技术分析

#### 5.1 声波收发单元的设计

声波收发单元是声学测温系统的重要组成部分。由于燃煤锅炉炉膛内的烟气成分比较复杂，温度高(最高温度可达 1900℃ 以上)，环境恶劣。因此，所设计的声波收发换能器不仅需要具有声波发射和接收的功能，而且要能够承受较高的温度。

目前，用于产生信号的声源种类有<sup>[12]</sup>：火花放电声源、电动声源和气动声源等。国内的科学工作者在进行高温换能器设计时，设计思路是在原有的换能器上加隔热衬底，国外多采用气动声源来产生声波信号。

#### 5.2 声波传播时间的测量

在炉膛温度场的声学测量技术中，声波传播时间的精确测量是实现温度场重建的关键，它的测量精度直接影响到温度场重建的准确性<sup>[11]</sup>。为了进行声波传播时间的精确测量，需要选择一种合适的声源信号(如正弦信号、扫频信号、白噪声、伪随机二进制序列等)，该信号必须具有较强的抗噪声干扰的能力；并需要设计一种合适的信号处理方法对噪声信号进行抑制。通常采用互相关函数法进行信号处理并抑制噪声。

#### 5.3 炉膛截面二维温度场的重建

在声学法燃煤锅炉炉膛温度场图象重建中，重建算法是实现温度场图象高精度重建的关键。典型的温度场重建算法有：最小二乘法温度场图象重建算法、傅立叶正则化温度场图象重建算法、基于 RBF 神经网络温度场重建算法等<sup>[13]</sup>。在各种算法中，沿着每条测量路径温度的分布函数  $L(l_k)$  是算法的技术关键，它直接影响重建温度场的结果。

##### 5.3.1 炉膛内烟气温度的仿真数学模型的假设

虽然实际运行中的工业燃煤炉膛内的温度场的分布极其复杂，但其总是连续分布的。某一点的温度值与其相临点的温度值不会存在很大的差异，即温度的变化是连续的。从经验来看，炉膛内的温度场模型大致分成以下三种情况<sup>[12]</sup>：

- (1) 燃烧正常。温度峰值处于温度场中心时的单峰对称温度场模型；
- (2) 火焰中心偏斜。火焰直接冲刷水冷壁管时的单峰偏温度场模型；
- (3) 由于吹入的煤粉分布不均匀，燃烧状况不佳，火焰出现多个峰值时的多峰温度场模型。

例如，假设温度场数学模型为<sup>[14]</sup>：

$$T(x,y)=a+b\cdot\sin(k_1\pi x)\cdot\sin(k_2\pi y)$$

其中，常数  $a$ 、 $b$  分别决定了模型温度场的最低和最高温度。假设炉膛的温度范围是 800K~1900K，则  $a=800$ ， $b=1100$ 。二维温度场和等温线分布情况分别如图 4、图 5 所示。

##### 5.3.2 炉膛内烟气温度场的重建思想<sup>[15-16]</sup>

重建工业锅炉某一截面的温度场，声波收发器的安装位置如图 6 所示。S1~S8 为测量系统的声波发射/接收器，S1~S8 对称均匀地安装于锅炉四壁，且位于同一平面，可以形成 24 条独立有效的发射/接收路径。按设定的程序，在一个检测周期顺序启闭各个声发射/接收器，通过测量声波沿每条声波

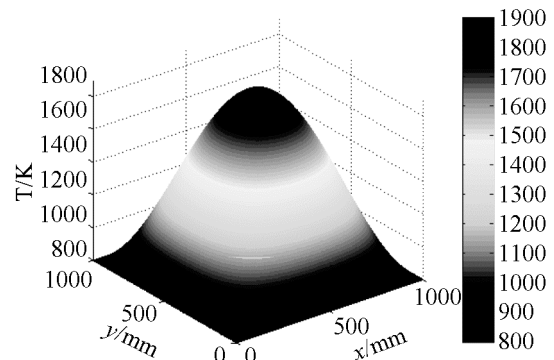


图 4 模型温度场的显示图  
Fig.4 The 3-D distribution curve of the model temperature field

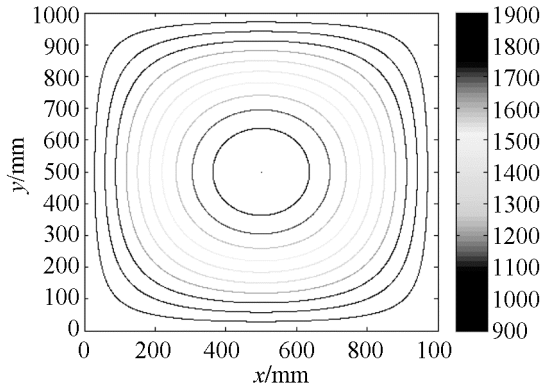


图 5 模型温度场的等温线图

Fig.5 The isothermal diagram of the model temperature field

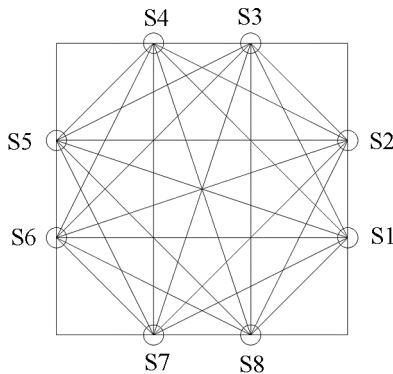


图 6 炉膛典型层面声学传感器的分布

Fig.6 The arrangement of acoustic sensors on the specified furnace section

路径的传播时间值, 经过重建算法, 便可重建炉内温度场典型平面温度分布。声学法温度场重建算法主要分为以下几个步骤:

- (1) 按照一定的方式, 将整个待测温度场划分成若干区域, 如图 7 所示;
- (2) 假设声波路径为直线, 确定每条声波传播路径上的温度分布函数  $L(l_k)$ ;
- (3) 按照一定的算法计算各网格点处的温度值, 拟合出整个平面的温度场, 实现温度场的重建。

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

图 7 温度场重建区域网格划分

Fig.7 The diagram of meshed grid in the region to reconstructed temperature field

### 5.3.3 温度场重建算法设计

将整个温度测量区域划分成适当数量的网格, 根据每条声线上的声波传播时间, 计算每条传播路径上的温度分布函数。利用这些已知路径上的温度

信息, 通过选择适当的插值方法, 估算整个测量区域上各网格点处的温度值, 从而实现“典型层面”温度场的重建。

## 6 声学测温技术存在的问题

与接触式的温度测量方法相比, 声学测温法具有瞬间测量、无温度漂移、实时在线显示炉膛内的温度场等优势, 但也存在一些不足。

### 6.1 多相的烟气介质对测量结果的影响

炉膛传声介质的物理性质对声波的传播速度、能量衰减、频率变化等都有一定的影响。燃煤炉膛内的高温烟气是一种混合介质<sup>[9]</sup>, 除包括  $N_2$ 、 $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $H_2O$  等气体外, 还包括煤粉等微粒物质。在炉膛空间的各个区域烟气分布不均匀, 烟气的组分也不断变化。温度场、速度场分布不均匀, 存在温度、速度梯度<sup>[17]</sup>。煤粉进气、吹灰等造成的背景噪声对声波信号的检测带来一定的影响。因此, 要实现如此复杂声场环境下的温度场测量具有一定的困难。

我们在进行温度场重建时, 一般假定声波在均匀介质中沿着直线传播, 显然, 炉膛内的烟气温度并不严格满足公式(1), 这将对温度测量结果带来一定的影响。

### 6.2 声波收发单元的布阵对测量结果的影响

为了获取炉内空间的温度场信息, 需要在炉内不同的高度平面上安装多组声发射与接收装置, 但现有的声发射、接收装置体积较大, 炉内的开孔尺寸也相应增大, 这将对炉内燃烧造成一定的影响。

布置一定数量的声波收发单元, 可以获取声线上的温度信息。增加收发单元的数量, 可以有效地提高网格点处的温度测量精度和温度场的重建精度, 但是温度场的重建时间也随之加长, 不利于实时监测炉内的温度场分布。

此外, 炉壁上的声波收发单元的空间分布对温度场重建精度也具有一定的影响。如何布置这些装置, 使声波传播路径尽可能多的覆盖待测量区域, 获取更多有效的温度信息, 是提高温度场的重建精度的一个重要研究内容。

### 6.3 温度场重建算法对测量结果的影响

在大型燃煤炉膛中, 温度场分布极其复杂, 采用任何有限形式的函数来描绘这一物理过程都存在着局限性。显然, 利用一个有局限性的数学模型来进行温度场的重建, 其精度要求是很难保证的。

此外, 温度场的重建算法也是影响测量结果的一个重要因素。

为了提高温度场的重建精度, 需要不断的积累经验, 设计更优秀的算法, 提出更吻合温度场分布规律的函数来描述声波路径上的温度分布规律。

## 7 声学测温技术的发展趋势<sup>[18-20]</sup>

锅炉炉内温度场的声学测量是一个跨学科的研究项目, 它涉及到声学、燃烧学、通信、信号与信息处理等多个学科, 研究内容涵盖了声波传播理论、声学相关特征量的测量、声波收发换能器的设计、燃烧传热数学模型的确定、多相流的热力学特性、声波信号的检测与信息处理等多个方面。燃煤炉膛内燃烧情况复杂, 各种气体组分悬殊, 要精确重建炉内温度场, 是一项复杂而有意义的工作。声学测温技术不仅可以应用于电站燃煤炉膛的温度监测, 在冶金工业的热处理炉、均热炉的温度场测量也可以发挥重要作用。

在以后的工作中, 我们需要重点研究声波在多相、具有温度梯度的烟气介质中的传播规律, 深入分析“声弯曲”、声波折射等对温度测量带来的影响; 设计耐高温、小尺寸、高灵敏度的声发射、接收单元; 提出吻合温度场分布规律的函数来描述声波路径上的温度分布规律, 设计优秀的温度场重建算法, 来促进声学测温技术的发展。

### 参 考 文 献

- [1] 刘彤, 荆欣, 庞力平. 发展中的锅炉炉内温度测量技术[J]. 现代电力, 2002, **19**(4): 18-19.  
LIU Tong, JING Xin, PANG Liping. Developing measurement of the temperature field of the furnace[J]. Modern Electric Power, 2002, **19**(4): 18-19.
- [2] 周怀春. 炉内火焰可视化检测原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
ZHOU Huaichun. The visual measurement principle and technology of the flamboyance in the furnace[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [3] 沈国清, 安连锁, 姜根山. 炉膛烟气温度声学测量方法的研究与进展[J]. 仪器仪表学报, 2003, **24**(4): 555-558.  
SHENG Guoqing, AN Liansuo, JIANG Genshan. Research and development of gas temperature measurement by acoustic pyrometry in furnace[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, **24**(4): 555-558.
- [4] 田丰, 邵富群, 王福利. 基于声波的工业炉温度场测量技术[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2001, **18**(3): 10-11.  
TIAN Feng, SHAO Fuqun, WANG Fuli. An introduction to measuring temperature field for industrial boiler based on acoustic wave[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2001, **18**(3): 10-11.
- [5] Kleppe J A. High-Temp gas measurement using acoustic pyrometry[J]. Sensors Journal, 1996, **13**(1): 17-22.
- [6] Kleppe J A. Adapt acoustic pyrometer to measure flue-gas flow[J]. Powcr, 1995, **139**(8): 46-47.
- [7] 宋志强, 李铁华, 李海涛. 声学法锅炉温度场检测技术的应用[J]. 广东电力, 2004, **17**(6): 10-14.  
SONG ZhiQiang, LI Tiehua, LI Haitao. Application of furnace temperature field detection using acoustic pyrometer[J]. Guang Dong Electric Power[J]. 2004, **17**(6): 10-14.
- [8] 安连锁, 沈国清, 张波, 等. 电站锅炉中声学测温的试验研究[J]. 电站系统工程, 2007, **23**(2): 23-25.  
AN Liansuo, SHEN Guoqing, ZHANG Bo, et al. Experiment study on acoustic pyrometry in power plant boiler[J]. Power System Engineering, 2007, **23**(2): 23-25.
- [9] KLEPPE J A. Engineering application of acoustics[M]. New York: Artech House, 1989.
- [10] 贾莉娜. 基于声学法的炉膛二维温度场图像重建[J]. 自动化仪表, 2004, **25**(9): 44-47.  
JIA Li'na. Image Reconstruction of two dimensional temperature field in furnace by using acoustic method[J]. Process Automation Instruction, 2004, **25**(9): 44-47.
- [11] 罗振, 孙小平, 田丰. 强噪声环境下声波信号时延估计方法的比较[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2005, **22**(2): 45-48.  
LUO Zhen, SUN Xiaoping, TIAN Feng. Compare of time delay estimation methods of acoustic wave signal in strong noise environment[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2005, **22**(2): 45-48.
- [12] 沈国清, 安连锁, 张波, 等. 电站锅炉声学测温中的声源选择及其信号互相关特性分析[J]. 现代电力, 2006, **23**(3): 41-46.  
SHEN Guoqing, AN Liansuo, ZHANG Bo, et al. Selection of Sound Sources and Cross-correlation Characteristic Analysis of acoustic signals in acoustic pyrometry in boilers[J]. Modern Electric Power, 2006, **23**(3): 41-46.
- [13] 孙小平, 田丰, 邵富群. 复杂温度场图像重建算法实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, **27**(3): 268-271.  
SUN Xiaoping, TIAN Feng, SHAO Fuqun. Image Reconstruction Algorithm for Complex Temperature Field[J]. Journal of North-eastern University(NaturalScience), 2006, **27**(3): 268-271.
- [14] 沈国清, 吴智泉, 安连锁, 等. 基于少量声学数据的炉内温度场重建[J]. 动力工程, 2007, **27**(5): 702-706.  
SHEN Guoqing, WU Zhiquan, AN Liansuo, et al. Reconstruction of temperature fields of furnace on the basis of few acoustic data[J]. Journal of Power Engineering, 2007, **27**(5): 702-706.
- [15] 沈国清, 安连锁, 张波, 等. 声学法重建炉内温度场的重建算法[J]. 锅炉技术, 2005, **36**(6): 52-55.  
SHEN Guoqing, AN Liansuo, Zhang Bo, et al. Research on reconstruction algorithm of temperature field by acoustic measurement in boiler[J]. Boiler Technology, 2005, **36**(6): 52-55.
- [16] 田丰, 邵富群, 王福利. 声学法工业炉温度场检测的现状与关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2002, **30**(6): 50-51.  
TIAN Feng, SHAO Fuqun, WANG Fuli. Status and key technology of acoustics method for industrial boiler temperature measurement[J]. Coal Science and Technology, 2002, **30**(6): 50-51.
- [17] 姜根山, 安连锁. 温度梯度场中声线传播路径数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, **24**(10): 210-214.  
JIANG Genshan, AN Liansuo. Numerical study on the propagation path of sound ray through the temperature gradient field[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, **24**(10): 210-214.
- [18] MASAHIRO S, SHOGO T. Measurement of time of flight for measurement of temperature distribution in boilers[J]. SICE, 2001, **37**(3): 185-192.
- [19] Lu J, Wakai K, Takahashi S, et al. Acoustic computer tomographic pyrometry for two-dimensional measurement of gases taking into account the effect of refraction of sound wave paths[J]. Measurement and Technology, 2000, **11**(3): 692-697.
- [20] Wilson D Keith. The sound-speed gradient and refraction in the near-ground atmosphere[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2003, **113**(2): 750-757.