

# 用光谱层析技术重建等离子束射流场\*

高益庆 金 瑜 邢 键 罗宁宁\*\*

(南昌航空工业学院无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

**摘 要** 提出了一种用光谱层析技术结合数值计算原理来重建等离子束射流温度、密度、压力和速度场的诊断方法。用 CCD 扫描光谱系统获得谱线强度,通过相对强度法重建温度场;再借助等离子射流有关物理方程来重建其它物理参量。分析了等离子束射流温度、密度、压力和速度场的空间分布特点以及它们之间的内在联系。

**关键词** 应用光学;光谱层析;等离子束射流;温度场;密度场;压力场;速度场

**中图分类号** K5270 **文献标识码** A

## 0 引言

等离子束射流是一个高速运动着的等离子体热源,其中存在着传导、对流和辐射等传热过程,也伴随着层流和紊流两种类型的流体运动。深入理解这一物理过程对理解和控制等离子束射流的物理特性及其应用有着极为重要的意义。由于这些过程交互作用十分复杂,难以用纯粹的试验方法精确地测定。万雄等人<sup>[1~5]</sup>用计算机层析技术重建了电弧等离子体三维温度场。Kovitya 和 Lowke<sup>[6]</sup>首先建立了 TIG 电弧传热数学模型并用数值方法求解了温度和流速分布。Ushio 和 Matsuda 所建的模型首次考虑了紊流问题<sup>[7]</sup>。但他们假定电流密度分布为已知条件,这就使得该模型实际上成为一个半经验模型。本文在局域热力学平衡(LTE)和光学薄的模型条件下,测出等离子体射流的谱线信号,然后从其谱线中选择两条特征谱线根据阿贝尔变换(Abel)求出它们的发射系数,用相对强度法重建等离子体射流的温度场,再借助有关等离子束射流场的物理方程,来重建等离子束射流密度、压力和速度场。

## 1 实验装置

实验是在以光谱仪及数据采集和处理软件、扫描装置和步进电机控制器为核心的高速扫描系统下进行的,具体实验诊断系统如图 1。本系统所用的等离子束射流是氩直流等离子束射流,它的工作气体为氩气,环境气体是空气。探针和光纤通过一旋钮耦合,此旋钮固定在扫描装置上,它的移动可带动探针精确移动。光纤探针的使用有效地抑制了非检测

点的光进入光谱仪,保证了每次所测谱线强度为等间距的各条弦上光强的线积分。扫描装置和步进电机控制器主要用来控制和带动空心探针对氩直流等离子束射流进行扫描。组合式多功能光谱仪及其软件用于对氩直流等离子束射流的光谱信号的采集和处理。采集完氩直流等离子束射流的光强数据后,不改变光谱仪的起始波长,采集一幅标准汞灯的谱线图(用于定标);最后通过谱线相对强度法和有关物理方程重建氩直流等离子束射流温度场。

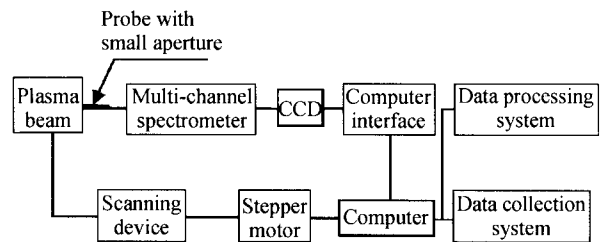


图 1 等离子束射流光谱层析诊断系统的原理  
Fig. 1 Block diagram of system using spectrum tomography

## 2 诊断原理

### 2.1 基本假定

本文诊断对象是氩直流等离子束射流,其重建的基本假设是:轴对称、定常流动;浮力与重力可忽略;等离子束射流为局域热力学平衡(LTE)<sup>[8]</sup>、光学薄<sup>[9]</sup>。

### 2.2 阿贝尔变换(Abel)

考虑到等离子束射流轴对称性,其谱强度  $I$  与发射系数  $\epsilon$  的关系符合阿贝尔方程

$$I(y) = 2 \int_y^R \frac{\epsilon(r) r dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} \quad (1)$$

式中,  $I(y)$  是离柱心距离为  $y$  处的谱强度,  $\epsilon(r)$  是离柱心距离为  $r$  处的发射系数。设想将等离子束射流的横截面分割成  $k$  个等间距  $\Delta r (\Delta r = R/k)$  的若干个同心环状区域,如图 2。

\* 江西省教育厅科技计划(赣教技字[2005]158号)和无损检测技术教育部重点实验室资助项目

\*\* Tel:0791-8203969 Email:ningningluo2002@sina.com  
收稿日期:2005-09-28

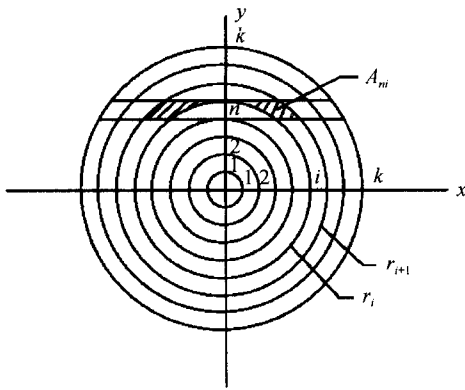


图2 等离子束横截面的网格区域划分

Fig.2 Net region division of plasma section

离散化的阿贝尔方程

$$I_n = 2\Delta r \sum_{i=n}^{k-1} A_m \epsilon_i(r) \quad (2)$$

式中

$$A_m = \{[(i+1)^2 - n^2]^{1/2} - (i^2 - n^2)^{1/2}\}$$

它形成一个上三角矩阵. 实验中首先由最外圈所对应的谱强度确定相应的发射系数  $\epsilon_{k-1}$ , 然后从外圈向中心依次计算, 便可获得各环状内的发射系数  $\epsilon_i$ .

## 2.3 基本方程

### 2.3.1 温度场的求解方程

$$\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} = \frac{\gamma_1 A_1 g_1}{\gamma_2 A_2 g_2} \exp\left(-\frac{E_{u1} - E_{u2}}{kT_e}\right) \quad (3)$$

式中,  $\epsilon, \gamma, A, g, E$  分别为相应波长的发射系数、频率、跃迁几率、统计权重和能级能量,  $k$  是玻耳兹曼常量,  $T_e$  为电子温度<sup>[10]</sup>.

### 2.3.2 密度场的求解方程

气体状态方程<sup>[10]</sup>

$$P_0 = (n_e + n_i + n_a) k T_e \quad (4)$$

式中,  $P_0$  为大气压,  $n_e, n_i, n_a$  分别为电子、离子和原子数密度.

准中性方程<sup>[10]</sup>

$$n_e = n_i \quad (\text{假设为一次电离}) \quad (5)$$

沙哈方程

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = \frac{2Z_i}{Z_a} \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2}\right)^{3/2} e^{-E_1/kT_e} \quad (6)$$

式中,  $m_e$  为电子质量,  $h$  为普朗克常量, 氩气一次电离能  $E_1 = 15.755$  eV,  $Z_i, Z_a$  分别为离子和原子的配分函数.

对于氩气有<sup>[11]</sup>

$$Z_i = 4 + 2 \exp\left(\frac{-2062}{T_e}\right) + \Lambda$$

$$Z_a = 1 + 60 \exp\left(\frac{-162500}{T_e}\right) + \Lambda$$

质量方程

$$\rho = n_e m_e + n_i m_i + n_a m_a \quad (7)$$

式中,  $m_i, m_a$  分别为离子和原子质量,  $\rho$  为等离子束射流的质量.

### 2.3.3 压力场的求解方程

电导率方程<sup>[12]</sup>

$$\sigma(r) = \left\{ 1.88 \left[ \frac{(m_e k T_e)^{1/2}}{\alpha e^2} \right] Q_{\alpha} + 1.69 \left[ \frac{m_e^{1/2} e^2}{k T_e^{3/2}} \right] \ln\left(\frac{R_D}{b_0}\right) \right\}^{-1} \quad (8)$$

式中,  $\alpha$  为电离度 (约为 1%), 德拜半径  $R_D = \sqrt{k T_e / 8\pi n_e e^2}$ ,  $b_0 = e^2 / 3k T_e$ ,  $e$  为基本电荷.

碰撞有效截面<sup>[13]</sup>为

$$Q_{\alpha} = \frac{v_{\alpha}}{[n_a (3k T_e / m_e)^{1/2}]^{-1}}$$

碰撞频率<sup>[9]</sup>为

$$v_{\alpha} = \sqrt{2\pi} r_a^2 \left(\frac{8k T_e}{\pi m_a}\right)^{1/2} n_a$$

其中氩原子半径  $r_a = 1.7 \times 10^{-10}$  m.

电场方程<sup>[10]</sup>

$$E_z(z) = I / \int_0^R 2\pi r \sigma(r, z) dr \quad (9)$$

欧姆定律方程<sup>[14]</sup>

$$j_z(r) = \sigma(r) E_z(r) \quad (10)$$

磁场方程<sup>[14]</sup>

$$B_{\theta}(r) = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r \xi j_z(\xi) d\xi \quad (11)$$

式中, 真空导磁率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Hm<sup>-1</sup>.

压力方程<sup>[10]</sup>

$$\frac{\partial P_z(r)}{\partial r} + j_z(r) B_z(r) = 0 \quad (12)$$

### 2.3.4 速度场的求解方程

对于氩直流等离子束射流通常满足以下条件

$$\partial u / \partial z \ll \partial u / \partial r, \partial T / \partial z \ll \partial T / \partial r, v \ll u, j_r \ll j_z$$

故有轴向动量方程<sup>[10]</sup>

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mu r \frac{\partial u}{\partial r}) \quad (13)$$

式中, 氩的粘性系数  $\mu$  可以用插值法求.

质量守恒方程<sup>[10]</sup>

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v)}{\partial r} = 0 \quad (14)$$

式中,  $u$  为轴向 ( $z$ ) 速度,  $v$  为径向 ( $r$ ) 速度.

## 2.4 计算区域与控制方程的离散

### 2.4.1 计算区域的离散

本文采用的是内节点法中适合于流场的交错网格<sup>[14]</sup>, 即将速度分量均定义在控制体的控制面上, 而压力变量仍然定义在控制体的中心. 如图 3.

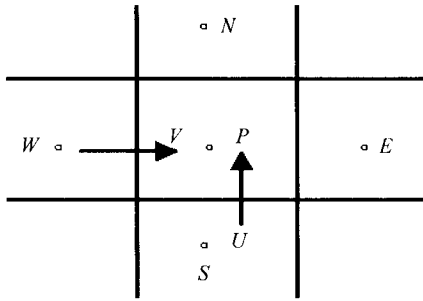


图3 交错网格  
Fig.3 Interlacing Grid

2.4.2 控制方程的离散:有限容积法  
轴向动量方程的离散<sup>[14]</sup>

$$a_w u(i-1, j) + a_{E_u}(i+1, j) + a_p u(i, j) + a_{S_u}(i, j-1) + a_{N_u}(i, j+1) = b \quad (15)$$

式中系数分别为

$$a_w = -\frac{[\rho(i-1, j) + \rho(i, j)]}{4\Delta r} v(i-1, j) - \frac{[\mu(i-1, j) + \mu(i, j)]r(i-1, j)}{4\Delta r[r(i, j) - r(i-1, j)]r(i, j)}$$

$$a_E = \frac{[\rho(i+1, j) + \rho(i, j)]}{4\Delta r} v(i+1, j) - \frac{[\mu(i+1, j) + \mu(i, j)]r(i+1, j)}{4\Delta r[r(i+1, j) - r(i, j)]r(i, j)}$$

$$a_p = \frac{[\rho(i+1, j) + \rho(i, j)]}{4\Delta r} v(i+1, j) + \frac{[\mu(i+1, j) + \mu(i, j)]r(i+1, j)}{4\Delta r[r(i+1, j) - r(i, j)]r(i, j)}$$

$$a_S = -\frac{[\rho(i, j-1) + \rho(i, j)]}{4\Delta z} u(i, j-1) - \frac{[\rho(i-1, j) + \rho(i, j)]}{4\Delta r} v(i-1, j) + \frac{[\mu(i-1, j) + \mu(i, j)]r(i-1, j)}{4\Delta r[r(i, j) - r(i-1, j)]r(i, j)}$$

$$a_N = \frac{[\rho(i, j) + \rho(i, j+1)]}{4\Delta z} u(i, j+1)$$

$$b = \frac{p(i, j-1) - p(i, j+1)}{2\Delta z}$$

质量守恒方程的离散

$$a_w v^{(i-1, j)} + a_p v^{(i, j)} + a_{E_v} v^{(i+1, j)} = b \quad (16)$$

式中系数分别为

$$a_w = -\frac{[r(i-1, j) + r(i, j)][\rho(i-1, j) + \rho(i, j)]}{8}$$

$$a_E = \frac{[r(i, j) + r(i+1, j)][\rho(i, j) + \rho(i+1, j)]}{8}$$

$$a_p = \frac{[r(i, j) + r(i+1, j)][\rho(i, j) + \rho(i+1, j)]}{8}$$

$$\frac{[r(i-1, j) + r(i, j)][\rho(i-1, j) + \rho(i, j)]}{8}$$

$$b = \frac{\Delta r}{\Delta z} \left\{ \frac{\rho(i, j-1) + \rho(i, j)}{4} u(i, j-1) + \left[ \frac{\rho(i, j-1) + \rho(i, j)}{4} - \frac{\rho(i, j) + \rho(i, j+1)}{4} \right] u(i, j) - \frac{\rho(i, j) + \rho(i, j+1)}{4} u(i, j+1) \right\} r(i, j)$$

2.5 计算域和边界条件的确定

氩直流等离子束射流速度场计算域如图4<sup>[9]</sup>。图4中, a-b-h-g 为阴极部分, a-b 是阴极电流入口端, d-e 为阳极壁面, e-f 为出口, a-g-f 为轴线, b-c-d 为氩气进入等离子束射流的区域。计算中所采用的边界条件如表1。

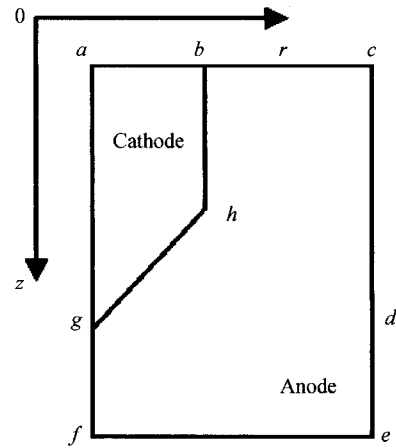


图4 氩直流等离子束射流的计算域  
Fig.4 Count area sketch Map of Ar plasma flow

表1 计算速度所用边界条件

	a-b	b-c	c-d	d-e
u	u=0	u=u <sub>01</sub>	u=u <sub>02</sub>	u=0
v	v=0	v=v <sub>01</sub>	v=v <sub>02</sub>	v=0
	e-f	f-g	g-a	
u	∂u/∂z=0	∂u/∂r=0	u=0	
v	∂v/∂z=0	v=0	v=0	

3 结果和分析

3.1 氩直流等离子束射流温度场的分布

由图5和图6可知,氩直流等离子束射流的温

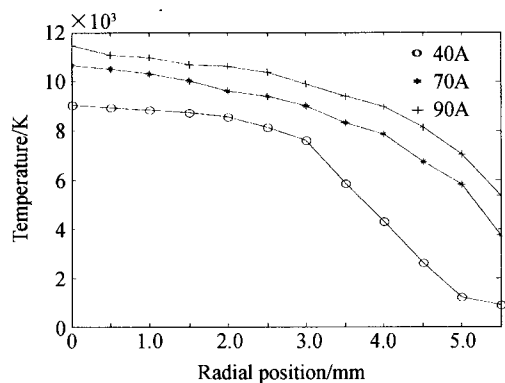


图5 不同电流下温度沿径向分布  
Fig.5 Radius distribution of temperature at different current

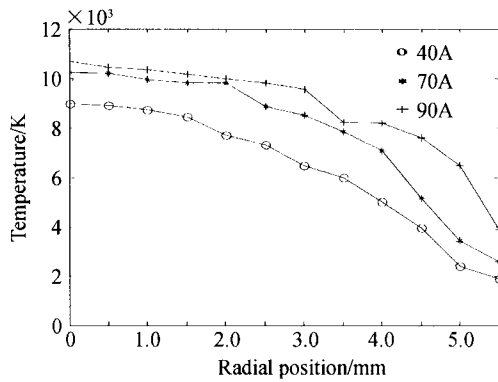


图 6 不同气流量下的温度沿径向分布  
Fig. 6 Radius distribution of temperature at different air flow

度在轴心处达到最大值,随半径增大而逐渐减小;在靠近中心处,温度变化梯度较小,而在远离轴心处,温度的变化率有增大的趋势.

### 3.2 氩直流等离子束射流密度场的分布

由图 7 和图 8 可知,氩直流等离子束射流的电子数密度随半径增大而逐渐减小;原子数密度随半径增大而逐渐增大,由于在轴心处氩直流等离子束射流的温度最高,因此在该处电离度达到最大,从而电子数密度最大,原子数密度最小;在靠近中心处,电子数密度减小比较快,随着半径的增大,电子数密度的变化率有减小的趋势.而在远离轴心处电子数密度非常小,几乎可以忽略.

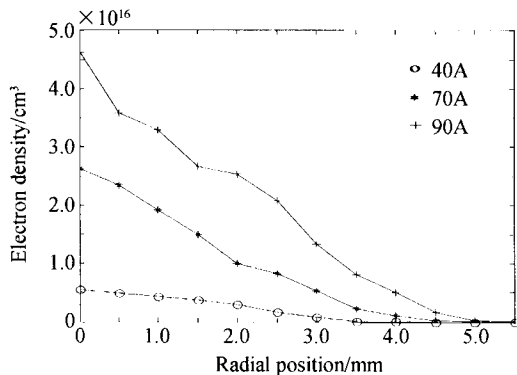


图 7 不同电流下电子数密度沿径向分布  
Fig. 7 Radial distribution of electron density at different current

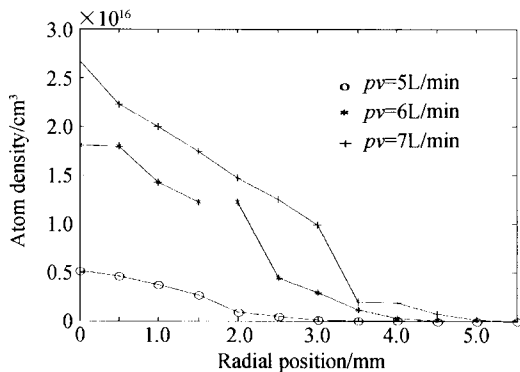


图 8 不同气流量下的原子数密度沿径向分布  
Fig. 8 Radial distribution of atom density at different air flow

### 3.3 氩直流等离子束射流压力场的分布

由于氩直流等离子束射流是一种高速的等离子束流,因此其内部各点的压力必定有差别.图 9 和图 10 表示不同电流和不同气压下的压力沿径向分布图.由图可知,氩直流等离子束射流的压力随半径增大而逐渐减小;在轴心处压力达到最大值,在边缘处等于环境压力(一个大气压);同时还可以看出在轴心附近压力差较大,而在远离中心的地方压力差非常小.

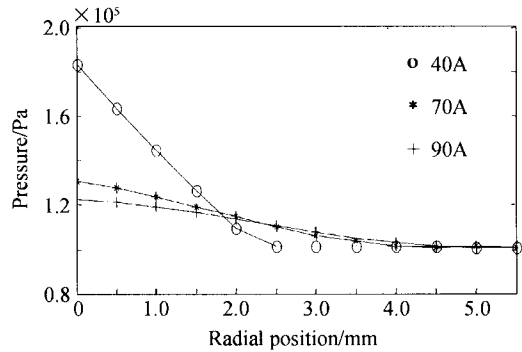


图 9 不同电流下压力沿径向分布  
Fig. 9 Radial distribution of pressure at different current

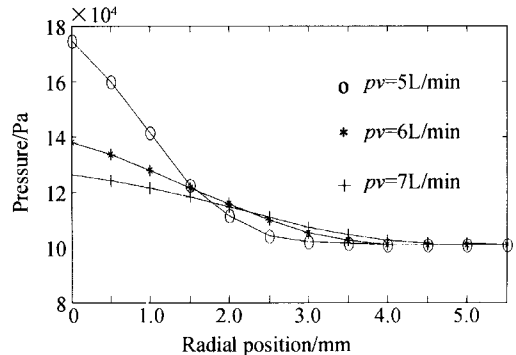


图 10 不同气流下压力沿径向分布  
Fig. 10 Radial distribution of pressure at different air flow

### 3.4 氩直流等离子束射流速度场的分布

图 11 和图 12 为轴向速度沿径向和轴向分布图.由图 11 可知,氩直流等离子束射流的轴向速度在轴心处达到最大值,随半径增大而逐渐减小;在靠近中心处,轴向速度变化梯度较小,而在远离轴心处,轴向

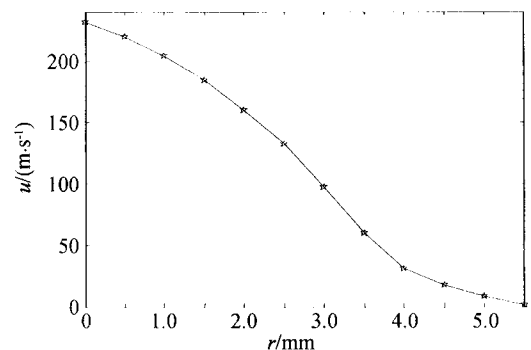


图 11 轴向速度沿径向分布  
Fig. 11 Radial distribution of axial velocity

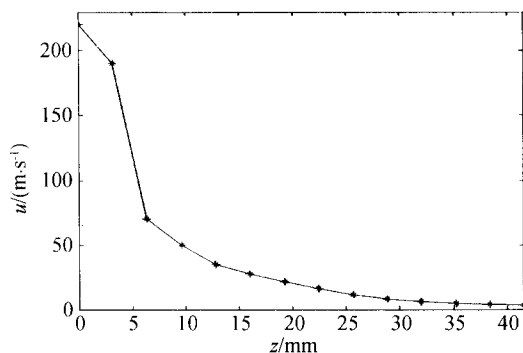


图 12 轴向速度沿轴向分布

Fig. 12 Axial distribution of axial velocity

速度的变化率有增大的趋势. 从图 12 可以看出, 在喷嘴附近区域的轴向速度非常大, 随着等离子束射流往下游流动, 由于等离子束射流和环境气体的相互作用越来越大, 使得等离子束射流的湍流粘性迅速增大, 从而导致等离子束射流轴向速度急剧下降.

图 13 和图 14 为径向速度分布图. 由图 13 可知, 氩直流等离子束射流的径向速度在偏离轴心的附近达到最大值, 然后随半径增大而逐渐减小; 它的大小和图 11 相比较就明显看出径向速度远小于轴向速度. 从图 14 可以看出, 氩直流等离子束射流的径向速度随离喷嘴距离增大而增大; 在轴心附近, 径向速度非常小, 而在远离轴心处, 径向速度有一定的大小, 但相对轴向速度来说还是非常小.

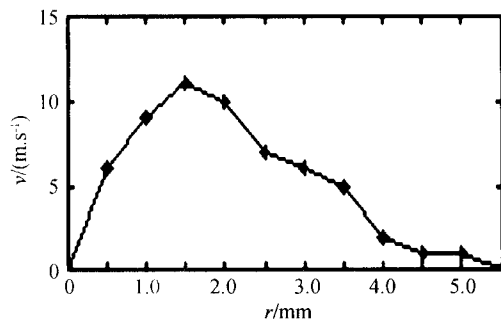


图 13 径向速度沿径向分布

Fig. 13 Radial distribution of radial velocity

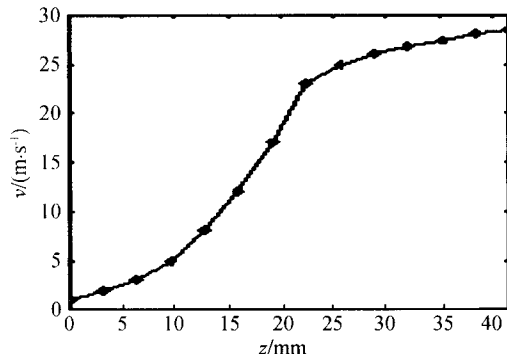


图 14 径向速度沿轴向分布

Fig. 14 Axial distribution of radial velocity

## 4 结论

本文介绍了用光谱层析技术重建氩直流等离子

束射流温度、密度、压力和速度场的实验系统、诊断原理和重建结果. 分析了氩直流等离子束射流温度、密度、压力和速度场在空间的分布特征以及它们的内在的联系. 诊断过程中发现重建氩直流等离子束射流温度场是非常关键的一步, 它的准确度对后面三个场重建的准确性起到决定性的作用. 在氩直流等离子束射流速度场的重建方法上, 不同于纯粹的数值模拟求解速度场的方法, 而是在实验测量结果的基础上结合数值计算来重建其速度场.

## 参考文献

- 1 万雄, 陶建文, 于盛林, 等. 扇束辐射层析技术重建三维流场. 光子学报, 2004, **33**(2): 252~256  
Wan X, Tao J W, Yu S S, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 252~256
- 2 高益庆, 何兴道, 龚勇清. 用投影空间重投影重建迭代法重建电弧温度场. 光子学报, 2001, **30**(2): 196~200  
Gao Y Q, He X D, Gong Y Q. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(2): 196~200
- 3 高益庆, 龚勇清, 赵希圣. 用正交光路全息干涉 CT 技术重建电弧等离子体三维温度场. 光子学报, 1998, **27**(1): 24~28  
Gao Y Q, Gong Y Q, Zhao X S. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(1): 24~28
- 4 高益庆, 龚勇清. 用莫尔计算机层析技术诊断三维电弧温度场. 光子学报, 1998, **27**(3): 376~380  
Gao Y Q, Gong Y Q. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(3): 376~380
- 5 蔡桂英, 殷爱菡. 光谱体层析技术诊断三维等离子体场. 光子学报, 2006, **35**(1): 52~56  
Cai G Y, Yin A H. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 52~56
- 6 Lancaster J F. *Physics of Welding*. Oxford: Pergamon press, 1986. 187~190
- 7 Ushio M, Matsuda F. *IIEW Document*, 1982. 7~15, 212~528
- 8 宋永伦. 焊接电弧等离子体的光谱诊断法及其应用的研究. 天津: 天津大学博士论文, 1988, **18**: 26~31  
Song Y L. *The study of the spectroscopic diagnostics in welding arc plasma*. Tianjing: Tianjing University, 1988. **18**: 26~31
- 9 Yu Lan. *Modelling of D C arc plasma torches and jets*. Beijing: Tsinghua University, 2000. 35
- 10 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体. 北京: 科学出版社, 1986. 49~50, 301~314  
Guo Z Y, Zhao W H. *Arc and hot plasma*. Beijing: Science Press, 1986. 49~50, 301~314
- 11 金佑民. 低温等离子体物理基础. 北京: 清华大学出版社, 1983. 58~61  
Jin Y M. *Physical foundation of low temperature*

- plasma. Beijing: Tsinghua University Press, 1983. 58 ~ 61
- 12 C. B. 德列斯文. 低温等离子体物理及技术. 北京: 科学出版社, 1980. 35
- C B D Lie S W. Physics and technology of low temperature plasma. Beijing: Science Press, 1980. 35
- 13 Vecquie S, Amara M Y, Gleizes A, *et al.* Experimental study of a Sfa arc I. *Phys D. Appl Phys*, 1982, **15**(5): 885~900
- 14 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 28, 43, 87
- Tao W Q. Numerical heat transfer (Second Edition). Xi'an; Xi'an Jiaotong University Press, 2001. 28, 43, 87

## Reconstruction of Plasma Flow Field by Spectrum Tomography

Gao Yiqing, Jin Yu, Xing Jian, Luo Ningning

*Key Laboratory of Nondestructive Test, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330063*

Received date: 2005-09-28

**Abstract** By means of using the spectrum tomography combining with the principle of numerical calculation, reconstruction of plasma flow temperature, density, pressure and velocity fields were proposed. Intensity of spectrum line was collected by CCD scanning system of fiber probe. Then, according to relative intensity method, the temperature field was obtained. Using plasma flow physical equations, other parameter fields were gotten. The spatial distribution characteristics of plasma flow temperature, density, pressure velocity field and intrinsic relation of them were completely analyzed.

**Keywords** Applied optics; Spectrum tomography; Plasma flow; Temperature field; Density field; Pressure field; Velocity field



**Gao Yiqing** received the M. S. degree in optical engineering from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 1987. Since then, he has been with the Laboratory of Photoelectricity Information of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, in Jiangxi Province, China, where he is a professor. His research interests have been in tomography for 3-D fluid fields, optical information processing and binary optics.