

基于标准温度法的电弧高温区自动判别研究

蒋 凡, 李元锋, 陈树君*, 李 诚

北京工业大学汽车结构部件与先进制造技术教育部工程研究中心, 北京 100124

摘 要 在电弧等离子体的光谱诊断中, 标准温度法测温原理与目前先进的图像传感技术相结合, 通过特征谱图像完成电弧全场温度信息采集, 因其良好的时、空分辨率而被广泛应用于电弧温度测量。但是谱线的发射系数与等离子体温度不是单调变化关系, 传统标准温度法选取一条 Ar I 谱线完成对电弧等离子体的测量, 在电弧内部的高温电离区域产生谱线辐射强度降低的现象, 需要人为判定电弧不同位置所处的温度区间才能完成温度的计算, 整个过程无法通过软件自主完成。针对此问题, 根据电弧等离子体的局部热力学平衡条件, 探索一种基于双特征谱线的标准温度法测温原理, 通过融合电弧在外层低温区域聚集的 Ar 原子发出的 Ar I 谱线发射系数场, 和在高温区域的 Ar 一次电离离子所发出的 Ar II 特征谱线发射系数场, 将达到 Ar I 谱线标准温度的位置处的 Ar II 谱线发射系数作为电弧不同温度区域的判定依据, 完成电弧等离子体高温区域的自动判别, 继而应用 Ar I 谱线发射系数与温度对应关系在电弧高、低温区域分别计算电弧温度, 消除单一的 Ar I 谱线发射系数场暗区给计算带来的不利影响; 设计并搭建了一种镜前分幅采集系统, 其中分光镜将弧光等能量分成两束, 利用两组反射镜和窄带滤光片建立起两路光学通道, 使 CMOS 在一次曝光中完成两组电弧特征谱图像的采集, 并且两幅图像的采集时刻、焦距、光圈等拍摄参数完全一致, 达到良好的时间、空间一致性, 从而减小谱线融合时误差的输出, 满足了原位获取两组电弧特征谱图像的需求; 为验证测量系统可行性以及后期的电弧图像提取, 以黑白棋盘为标靶, 用 Harris 算子对系统采集的图像进行扫描, 根据角点坐标证明系统所采集的两幅图像具有良好的一致性, 并且据此将两幅图像做归一化处理, 以便后期的电弧特征谱图像的提取; 通过假设所测电弧等离子体具有轴对称属性, 以 CMOS 所采集的特征谱图像亮度信息作为电弧发射系数场在不同角度下的投影依据, 经过中值滤波降噪后, 利用 ML-EM 迭代重建算法求解电弧的三维发射系数分布。实验中, 选择受自吸收效应影响较小的 Ar I 696.5 nm 谱线和 Ar II 480.6 nm 谱线为测量目标, 并且在 696.5 nm 谱线的光通路中加入 OD0.4 的中性减光片, 使两幅特征谱图像的最高亮度值保持一致。选取 150A 焊接等离子弧为测量对象, 经 ML-EM 法三维还原后, 将两条谱线发射系数场等像素融合, 在 Ar I 谱线发射系数达到最大值的像素点位置处, Ar II 谱线发射系数达到 ϵ_p , 判定 Ar II 谱线发射系数大于 ϵ_p 的像素点位置为电弧高温区域, 其余位置为低温区域, 最终在不同温度区域自动完成焊接等离子弧的温度计算。实验结果表明 696.5 nm 谱线和 480.6 nm 谱线发射系数场融合后可以自动识别电弧高温区域, 继而完成电弧等离子体的自动测量, 为电弧温度实时监测的实现提供更多可能。

关键词 焊接电弧等离子体; 标准温度法; 电弧温度场

中图分类号: TG403 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)02-0370-07

引 言

电弧等离子体温度分布是描述其热力学状态的重要的物理参数, 对弧焊的焊接效率和焊接质量有着重要的影响, 了

解焊接电弧温度场有助于进一步提升弧焊工艺水准, 目前针对电弧温度场的传感测量已成为电弧焊研究领域的一大发展方向。相较于其他电弧温度诊断方法, 标准温度法通过一次测量即可获取全场温度信息, 同时兼具良好的时间、空间分辨率, 使其被国内、外研究者广泛使用^[1-2]。Thornton 测量了

收稿日期: 2017-12-21, 修订日期: 2018-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875004), 北京市自然科学基金项目(3172004)和先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金项目(AWJ-16-M06)资助

作者简介: 蒋 凡, 1987 年生, 北京工业大学汽车结构部件与先进制造技术教育部工程研究中心副研究员 e-mail: jiangfan@bjut.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: sjchen@bjut.edu.cn

不同 Ar 谱线下的 TIG 电弧的温度，最后比较了结果的差异^[3]。日本的 Kazufumi Nomura 等搭建了多 CCD 同步采集系统，用标准温度法测量了移动的 TIG 电弧温度场信息^[4]。哈尔滨工业大学的 Ma 等通过标准温度法测量了脉冲 TIG 电弧温度场信息^[5]。

然而在标准温度法诊断过程中，需要电弧内部最高温度超过所选谱线的标准温度^[6]，研究者一般选取一条 Ar 原子谱线来完成测量，但当空间某一位置达到谱线标准温度后，该处发射系数达到最大值，此后随着温度的升高或降低，发射系数开始呈单调降低趋势，导致在同一发射系数下存在一个高温温度和一个低温温度与其相对应，只能通过人为判定当前所处温度区间来确定温度取值^[4]，不利于电弧温度全自动测量。

对此，本文基于标准温度法测温原理，提出一种基于双特征谱线的标准温度法测温技术，利用 Ar II 谱线能级较高的特性来作为判断电弧内部高温区域位置的判据，进而利用 Ar I 谱线发射系数与温度关系曲线来完成电弧温度计算；设计并搭建了一套镜前分光系统，通过分光装置让高速相机在一次曝光中同时采集两条谱线的特征谱图像，并保证所采集的不同特征谱线的图像具有良好的空间一致性。实验表明，通过具有良好一致性的两条谱线的发射系数场信息，测量系统可以自动完成电弧若干个截面的高温区域判别和温度的计算。

1 电弧温度诊断原理

1.1 基于双特征谱线的标准温度法

当电弧等离子体处于局部热力学平衡状态时，标准温度法通过标定 Ar I 谱线发射系数场中最大值来计算电弧温度^[7]，将谱线发射系数表达式归一化后，得到

$$\epsilon = \frac{N_i(T)}{Z_i(T)} \exp\left(-\frac{E_n}{k \times T}\right) \quad (1)$$

其中， $N_i(T)$ 为密度函数， $Z_i(T)$ 为配分函数， E_n 为所选谱线的激发能级， k 为玻尔兹曼常数， T 为温度。从式(1)中得知，同一特征谱线的发射系数 ϵ 的相对强度仅与温度 T 有关，在等离子体温度超过谱线的标准温度后，发射系数 ϵ 开始下降。Ar I 和 Ar II 谱线归一化后的发射系数和温度变化曲线如图 1(a)所示。Ar I 谱线发射系数在喷嘴下方 1 mm 位置处的径向分布如图 1(b)所示，根据图 1(a)，M 和 N 位置处的发射系数数值相同，但各存在两组温度值与其相对应，无法直接判断 M 和 N 位置的温度取值。Ar II 谱线发射系数的径向分布如图 1(c)所示，由于 Ar II 谱线标准温度较高，发射系数沿径向方向呈单调变化趋势。

对此，根据电弧内部两条谱线的空间分布，设计了一种基于双特征谱线的标准温度法测温原理，结合 Ar II 谱线来确定电弧内部超过 Ar I 谱线标准温度的区域，从而判断 Ar I 谱线发射系数所对应温度。考虑到所选谱线应与其他谱线不产生干涉影响，并且受到自吸收效应影响较小，选择 696.5 nm Ar I 谱线和 480.6 nm Ar II 谱线为测量目标，在电弧内部某一位置达到 Ar I 谱线标准温度时，Ar II 谱线发射

系数达到 ϵ_{tp} 。

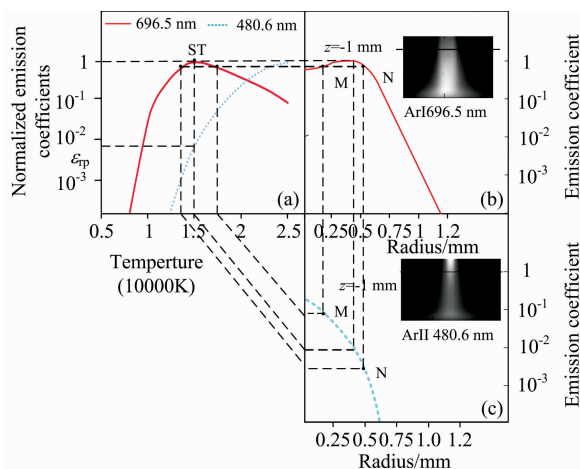


图 1 电弧发射系数场信息

Fig. 1 Line emission coefficients distributions for plasma arc

根据图 1 中两条特征谱线发射系数与温度对应关系，可以得知在超过 Ar I 谱线标准温度的电弧径向截面上，两条谱线发射系数分布如图 2(a)所示，Ar I 谱线发射系数呈 M 型，随着向中心径向距离的减少，发射系数开始上升，在 A 位置处发射系数达到最大值 ϵ_{max} ，此后发射系数呈降低趋势；Ar II 谱线发射系数从两侧向中心呈增长趋势，在 A 位置处发射系数上升到 ϵ_{tp} 后进一步升高，电弧温度分布如图 2(b)所示。在达不到 Ar I 谱线标准温度的截面上，Ar II 谱线发射系数均低于 ϵ_{tp} 。据此可以看出在 Ar II 谱线发射系数值大于 ϵ_{tp} 的位置均为电弧内部超过 Ar I 谱线标准温度的高温区域。

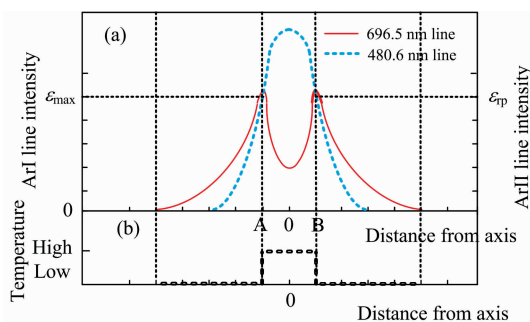


图 2 电弧内部谱线发射系数与温度分布关系

Fig. 2 Relationship between emission coefficients and temperature distributions for argon arc plasma

在电弧的高温区确定后，将所采集的 696.5 nm 谱线发射系数场做归一化处理，然后用谱线发射系数与温度曲线 ST 点的左段拟合电弧的低温区发射系数，用曲线 ST 点的右段拟合电弧的高温区发射系数。

1.2 ML-EM 三维还原

如图 3 所示，由 CMOS 采集的谱线辐射强度 P 是电弧发射系数场在直线 AB 上的积分，假设电弧具有轴对称属性，在不同角度下的辐射强度值相同，利用 ML-EM 法将发

射系数场的二维投影转换为三维的发射系数径向分布。在每层电弧截面分成 $n \times n$ 个正方形网格，总共 N 个正方形网格将电弧截面完整覆盖，使原本连续的电弧发射系数离散化，在第 j 个正方形网格上的发射系数 λ_j 为网格内发射系数的平均值。被离散的电弧发射系数共有 M 个投影积分，第 i 个投影值 P_i 为沿着投影路径 AB 穿过的网格中发射系数综合作用的结果。截面上的每个网格的平均发射系数 λ_j 对投影 i 的贡献为 w_{ij} ，由投影线 L 与网格交线的长度决定。重建过程中第 n 个网格内的待重建元素 f_j 迭代公式为

$$f_j^{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^M \frac{w_{ij} \times p(n)}{\sum_{i=1}^N w_{ij} \times f_j^{(k)}}}{\sum_{i=1}^M w_{ij}} \times f_j^{(k)} \quad (2)$$

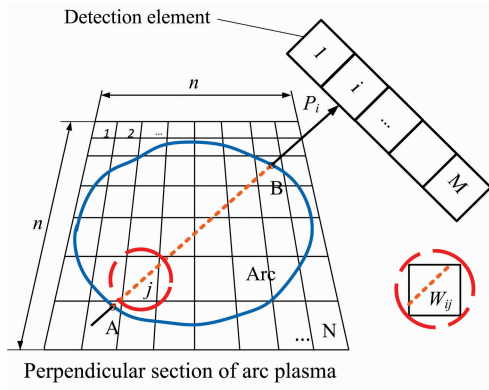


图 3 三维测量原理图

Fig. 3 Schematic of 3D measurement method

2 实验部分

2.1 测量系统设计

为了保证两条测量谱线的一致性，本文设计并搭建了一套分幅测量系统，使两幅电弧特征谱图像同时被一台 CMOS 相机采集，并且两幅图像在拍摄角度、采集时刻、曝光时间、光圈大小、焦距等方面达到完全一致。该系统主要包括起偏器、分光镜、反射镜、窄带滤光片、CMOS 相机等部分组成，其结构如图 4(a) 所示。分光镜将电弧光源向一个角度发出的待测光分成两束，然后通过反射镜汇聚到 CMOS 感光元件的不同位置处，在一个反射镜前加入 (696.5 ± 2) nm 的窄带滤光片以获取 Ar I 谱线图像，在另一个反射镜前加入 (480.6 ± 2) nm 的窄带滤光片来获取 Ar II 谱线图像。为了确保 CMOS 清晰成像，两束光在空间中传播的光程应相同，CMOS 中心线与分光镜延直线 OB 排布，从空间中 A 位置发出的电弧连续光谱以 45° 偏角进入分光镜，在分光镜的作用下被等能量分为两束，一束光沿原方向辐射到反射镜 M2，另一束光被偏折 90° 辐射到反射镜 M1。反射镜 M1 和 M2 排布在以相机感光元件位置为中心的圆弧轨迹上，改变了两束光的传播方向，使其经镜头汇聚后在 CMOS 上成像。

将两幅电弧图像呈现于 CMOS 总宽度的 $1/3$ 和 $2/3$ 位置处，根据相关成像公式，可得反射镜组和 CMOS 相机感光元件中心的夹角 θ 为

$$\theta = 2 \arctan \left(\frac{1}{12} \times \frac{w}{f \times k} \right) \quad (3)$$

式(3)中， w 为感光元件宽度， f 为镜头焦距， k 为镜头焦距转换系数。反射镜 M1 法线与直线 BM1 夹角 α 为

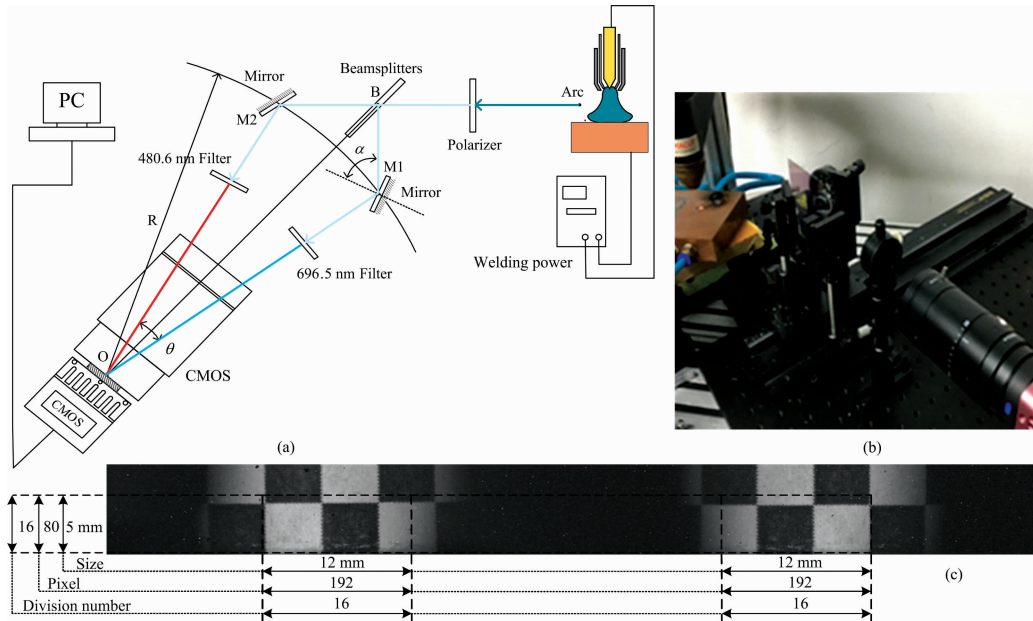


图 4 实验装置

(a): 光学原理图; (b): 测量系统; (c): 测量区域信息

Fig. 4 Experimental setup

(a): Light splitting structure; (b): Appearance of experimental apparatus; (c): Measurement region and division number

$$\alpha = 67.5^\circ - \frac{1}{4}\theta \quad (4)$$

反射镜 M1 和 M2 与 B 点距离 L_f 为

$$L_f = \frac{L_s}{\left[\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\tan \frac{\theta}{2}} \right]} \quad (5)$$

式(5)中, L_s 为分光镜中心点 B 到 CMOS 中心点 O 的距离。

图 4(b) 为本实验中搭建的测量系统的硬件原型, 在 500 : 1 的起偏器的作用下, 焊枪喷口和工件产生的反光被削弱, 待测区域的图像信息同时呈现在 CMOS 中, 分辨率均为

$$wp = \frac{W}{L} \times f \times k \times \frac{1}{c} \quad (6)$$

$$hp = \frac{H}{L} \times f \times k \times \frac{1}{c} \quad (7)$$

其中, wp 为图像水平方向像素数, hp 为垂直方向像素数, W 为视场宽, H 为视场高, L 为线段 OB 和 AB 的长度和, c 为相机像元尺寸。

实验使用的 CMOS 相机为瑞士 PhotonFocus 公司的 DR1-D1312-200-G2 高速相机, 采用 A1312 图像传感器, 光谱响应范围为 370~1 000 nm, 图 4(c) 所示的每个测量区域的视场大小为 12 mm × 5 mm, 测量区域像素点为 192 × 80, 平均 1 mm² 视场所对应的像素点阵大小为 16 × 16。

2.2 测量系统验证

本文设计的采集系统通过 CMOS 镜前分光 的成像方式, 保证了两幅图像在采集时间上具有很好的一致性, 为了进一步检验其空间一致性, 以黑白棋盘为待测目标, 将角点作为标识点来验证测量系统。在棋盘中心为原点建立坐标系, 根据测量系统特征, 可得到如图 5 所示的坐标等效示意图, 由于两幅图像的拍摄参数和距离相同, 图像中线段 P_1Q_1 可以看作是棋盘相邻角点距离 PQ 在 $\alpha(x_1, y_1)$ 方向下的投影, P_2Q_2 可以看作是线段 PQ 在 $\beta(x_2, y_2)$ 方向下的投影, 投影 P_1Q_1 和 P_2Q_2 长度分别为 λ_1 和 λ_2 , 有

$$\lambda_1 = | \vec{e}_\alpha \times \vec{PQ} | \quad (8)$$

$$\lambda_2 = | \vec{e}_\beta \times \vec{PQ} | \quad (9)$$

$$P_1\vec{Q}_1 - P_2\vec{Q}_2 = (\vec{e}_\alpha - \vec{e}_\beta) \times \vec{PQ} = 0 \quad (10)$$

当 $\alpha(x_1, y_1)$ 和 $\beta(x_2, y_2)$ 在 x 轴方向均为正的情况下, 如果两幅图像的采集方向完全相同, 则 λ_1 和 λ_2 大小相等。

实验结果如图 6 所示, 用基于 Harris 算子的棋盘格检测算法完成了棋盘图像的扫描, 根据所获得的角点坐标和上述公式, 确定了两幅图像是在被测目标的相同方位角下采集的, 并且图像大小相同, 所采信息除具备极好的时间一致性, 还拥有良好的空间一致性。

以焊接等离子弧为测量对象, 焊接系统使用北京工业大学自主研发的变极性等离子弧焊接系统 VPPA-300, 阳极采用水冷铜极, 实验过程中保持焊接电流为 150 A, 离子气流量 3.5 L · min⁻¹, 保护气流量 10 L · min⁻¹, 弧长 5 mm, 钨极直径内缩量 4 mm, 钨极夹角 50°。

实验时为了在一次曝光中保证两幅电弧窄带图像的成像质量, 需要降低相机暗电流、过曝光等因素给测量结果带来的误差。实验时, 通过 OD0.4 的中性密度滤光片, 将两幅图

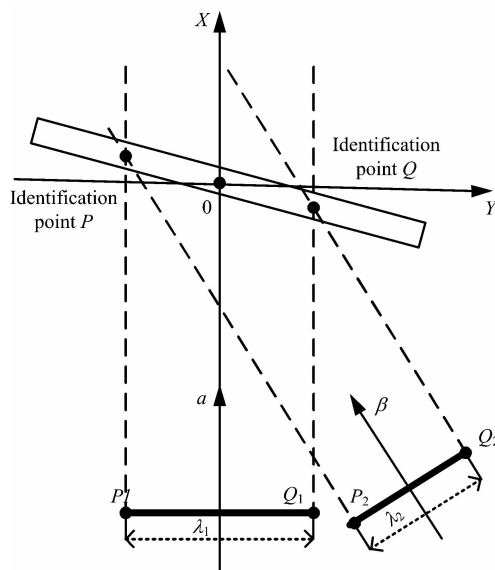


图 5 测量系统坐标等效示意图

Fig. 5 Schematic of measurement system coordinates



图 6 棋盘格角点信息

Fig. 6 Detected checkerboard corners

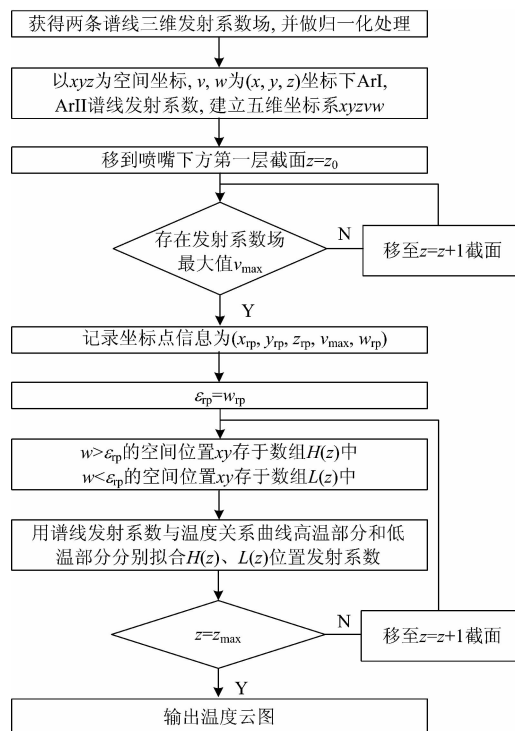


图 7 测量流程图

Fig. 7 Flow chart of measurement

像最高亮度值同时控制在 CMOS 最大感光量的 85% 左右。

基于双谱线的标准温度法测温步骤如图 7 所示。首先, 确定根据拍摄的两个电弧窄带图像还原两条谱线发射系数场信息, 然后将两个发射系数场融合, 在达到 Ar I 谱线标准温度的位置上, 将 Ar II 谱线的发射系数值 ϵ_p 作为判定电弧高温区的依据, 实现电弧高、低温区域的自动判定, 最后利用 Ar I 谱线发射系数与温度函数关系完成电弧温度的计算。

3 结果与讨论

图 8 为测量系统采集的特征谱电弧图像。在 480.6 nm 的窄带图像中, 由于喷嘴下方温度较高, 此区域呈高亮状



图 8 电弧特征谱图像

Fig. 8 Optical image acquired by CMOS

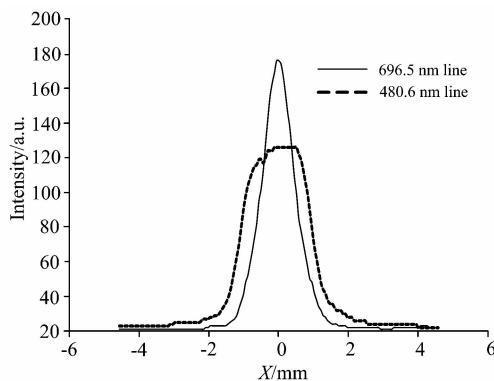


图 9 喷嘴下方 1 mm 处谱线亮度分布信息

Fig. 9 Integrated intensity distribution at the position of 1 mm below the nozzle

将二维的特征谱图像亮度信息, 经 ML-EM 法重建后得到三维电弧发射系数场。图 10(a) 为喷嘴下方 1 mm 处 696.5 nm 谱线的发射系数场截面, 该截面直径接近 2.4 mm, 随着向轴心径向距离的降低, 发射系数逐渐增加, 在距中心 0.6 mm 的坐标点 $P(m, n)$ 处, 发射系数达到最大值。图 10(b) 为电弧阴极下方 1 mm 处 480.6 nm 谱线的发射系数场截面, 发射系数向中心呈增大趋势, 最终达到此截面最大值 0.72, 点 $P'(m, n)$ 为点 P 在此截面的映射, 发射系数值 ϵ_p 为 0.15。可以认为在 480.6 nm 谱线截面中, 所有发射系数大于 ϵ_p 的区域均为超过 696.5 nm 谱线标准温度的高温区域, 将截面中所有处于高温区域的坐标点标记为 1, 低温区的坐标点标记为 0, 最终得到如图 10(c) 的高温区域分布图。

图 11(a) 为电弧 696.5 nm 谱线的发射系数场, 图 11(b) 为电弧 480.6 nm 谱线发射系数场。图 11(c) 为电弧内部超过 Ar I 谱线标准温度的高温区域, 由于等离子电弧拘束程度较

态, 图像最大亮度值为 223; 在 696.5 nm 的窄带图像中, 由于工件上方达到谱线激发能级的原子数量增多, 导致 Ar I 谱线发射系数在空间中一个方向的积分值增加, 因此工件上方出现高亮区域, 最高亮度值为 212。两幅图像在最大亮度相差 5% 的情况下, 696.5 nm 谱线发光区域面积约大 40%。

图 9 为 CMOS 采集的喷嘴下方 1 mm 处两条谱线亮度信息。由于弧柱中心区域的温度较高, 热电离条件最为充分, 大量到达电离电位的 Ar 原子发生电离, Ar II 谱线辐射强度向中心呈较大增强趋势, 同时原子密度的降低, 导致采集到的 Ar I 谱线强度开始出现波动。此外, 在电弧中心强烈的电离作用下, 电离区域电弧挺度较好, 因此在同一方位角下采集到的 480.6 nm 谱线强度分布具有良好的对称性。

高, 电离程度更大, 能量密度更加集中, 高温区从阴极延伸到工件。

图 12 为最终电弧温度计算结果。由于等离子弧焊钨极内缩于水冷喷嘴, 导致部分电弧不可见, 在焊接电流为 150 A

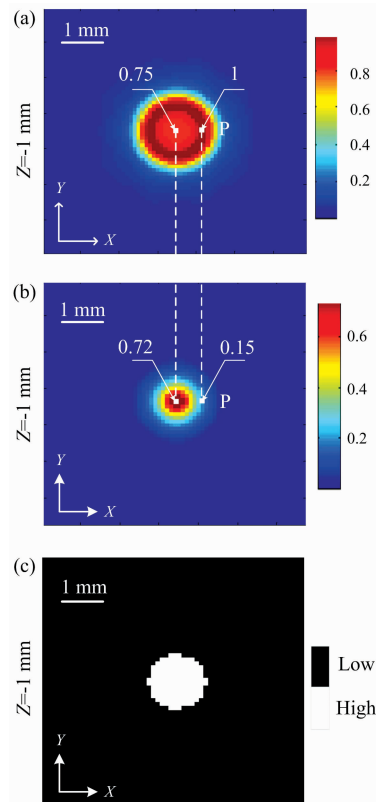


图 10 喷嘴下方 1 mm 处谱线发射系数和高温区域分布
Fig. 10 Emission coefficients and high temperature distribution at the position of 1 mm below the nozzle

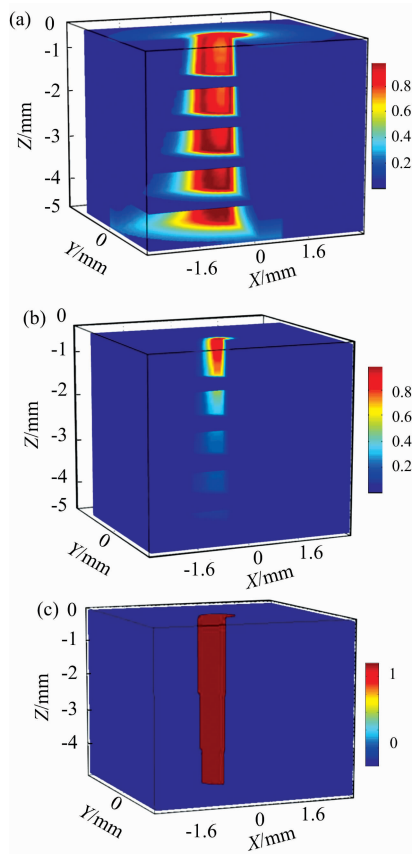


图 11 等离子电弧内部谱线发射系数和高温区域分布
Fig. 11 Emission coefficients and high temperature distribution of plasma arc

时,喷嘴下方的可见电弧内部最高温度超过 17 000 K, 相比常压下自由电弧低^[8], 但是可以看出受到机械压缩效应、热

压缩效应和磁压缩效应后,向工件传递热量的过程中损失的热量较小。

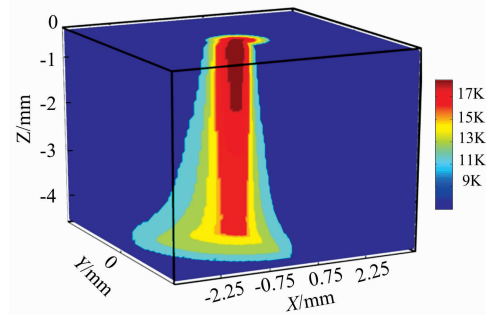


图 12 等离子电弧温度分布
Fig. 12 Temperature distribution of plasma arc

4 结 论

提出一种基于双特征谱线的标准温度法测温技术和测量系统,从连续的电弧光辐射中选取两条谱线作为测量目标,应用所设计的光学测量系统在保证时、空一致性的情况下完成强度分布的采集,根据所采集的两条谱线完成电弧高、低温区域判别,实现电弧温度场的自动计算。

实验结果表明,测量系统所采集的两幅特征谱图像具有良好的时、空一致性,有效解决了同步获取电弧两条谱线信息的难题。同时,以电流为 150 A 的焊接等离子弧为测量目标,采集 696.5 和 480.6 nm 谱线发射系数场,证明 480.6 nm 谱线发射系数场中 ϵ_p 可以为电弧高温区识别提供依据,并利用 696.5 nm 谱线发射系数与温度的变化曲线分别拟合电弧高、低温区域发射系数场,完成焊接等离子弧温度测量。本文解决了传统标准温度法测量中电弧高温区域的判别问题,为电弧温度场自动计算的实现提供了一套重要的解决方案。

References

- [1] Shibukawa A, Katsui A, Iwamura H, et al. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2004, 26(1): 34.
- [2] XIAO Xiao, HUA Xue-ming, WU Yi-xiong, et al(肖 笑, 华学明, 吴毅雄, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2012, 32(9): 2327.
- [3] Thornton M F. Journal of Physics D—Applied Physics, 1993, 26(9): 1432.
- [4] Nomura K, Kishi T, Shirai K, et al. Welding in the World, 2015, 59(2): 283.
- [5] Ma S, Gao H, Zheng S, et al. Journal of Physics D Applied Physics, 2011, 44(40): 405202.
- [6] Farmer A J D, Haddad G N, Cram L E. Journal of Physics D Applied Physics, 1986, 19(9): 1723.
- [7] Ma S, Gao H, Wu L. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(4): 1054.
- [8] Kyohei K, Masaya S, Manabu T, et al. Welding International, 2016, 30(8): 590.

Analysis on Automatic Discrimination of High Temperature Based on Fowler-Milne Method

JIANG Fan, LI Yuan-feng, CHEN Shu-jun* , LI Cheng

Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Components, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In the research field of arc plasma spectrum diagnosis, combined with the advanced image sensing technology, the Fowler-Milne method uses spectral image to obtain temperature information of arc plasma. Because of its high time and space resolution, the Fowler-Milne method is widely used in arc plasma temperature measurement. However, the relationship between line emission coefficient and temperature is not monotonous, and traditional Fowler-Milne method selects one Ar I spectral line to complete the measurement, which leads to the decrease of line intensity, and the process of measurement needs researchers to determine the temperature range of different locations to complete the calculation of temperature. The whole process can't be automatically completed by software. In view of this problem, based on PLTE conditions of arc plasma, applying the partial LTE model of arc plasma, modified Fowler-Milne method based on two spectrum line, which combines the Ar I spectral line emitted by Ar atoms in an outer low temperature region of arc, and the Ar II spectral line emitted by Ar ionization ion in high-temperature area of arc, to determine the different temperature range of the arc plasma, and then the whole temperature is calculated by the temperature corresponding to the intensity of the Ar I spectral line in low-temperature area and high-temperature area, eliminating the adverse effects of single Ar I spectral line emission coefficient field. A light splitting system was also designed and built, dividing the light of arc into two beams by a spectroscope. Two sets of reflectors and narrow-band filters were used to collect the image of two sets of arc spectral images though one exposure, of which parameters such as the focal length aperture are exactly the same, achieving good time and spatial consistency and reducing the error of emission coefficient fusion. In order to verify the feasibility of measurement system and arc image extraction, black and white chessboard was used as a target, and the extraction of corners extracting of two image proved the system satisfies the demand of collecting two groups of arc spectral images, and was also used to normalize two images for the extraction of arc image in the later stage. Based on the assumption that the plasma arc has axisymmetric properties, with the brightness information of spectral image CMOS collected as the integration of emission coefficient under different angle projection, after the median filter noise reduction processing, ML-EM method was used to reconstruct the 3D emission coefficient distribution from the 2D luminance distribution. In the experiment, Ar I 696.5 nm spectral line and Ar II 480.6 nm spectral line with little self-absorption effect were selected. The OD0.4 ND filter was added in the pathway of 696.5 nm spectral line, to make the maximum brightness value of the two spectral images consistent. 150 A welding plasma arc was measured in the experiment. After three-dimensional reduction of ML-EM method, the two spectral line emission coefficient fields were fused. At the pixel point location where the Ar I spectral line reaches the maximum value, Ar II spectral line reaches ϵ_{fp} , which were used to determine the high-temperature zone or low-temperature zone. The measurement of the plasma arc of 150 A showed that 696.5 and 480.6 nm spectral line can automatically identify the high-temperature zone in welding arc plasma, making it more possible for the arc temperature real-time monitoring to be realized.

Keywords Welding arc plasma; Fowler-milne method; Arc temperature field

(Received Dec. 21, 2017; accepted Apr. 19, 2018)

* Corresponding author