

# 氩等离子体紫外光 A 和 B 辐射属性计算

王 飞<sup>1,2</sup>, 李 桓<sup>1</sup>, Cressault Yann<sup>2</sup>, Teulet Philippe<sup>2</sup>, 杨 珂<sup>1</sup>

(1. 天津大学 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072;

2. Université de Toulouse, UPS, INPT, LAPLALÉ, Toulouse 31062, France)

**摘 要:** 焊接等离子体释放的紫外光 A(315 ~ 400 nm) 和紫外光 B(280 ~ 315 nm) 是皮肤癌的重要诱因. 基于净辐射系数的概念, 考虑了连续谱(复合辐射和韧致辐射)和线谱等辐射机制, 计算了氩等离子体在常压、5 000 ~ 25 000 K 内的紫外光 A, B 的辐射属性. 结果表明, 随着等离子体半径  $R_p$  增加, 全谱辐射发生强烈的自吸收效应, 而紫外光 A, B 基本无自吸收; 当  $R_p = 1$  mm 时, 它们在总谱辐射(35 ~ 4 500 nm) 的最大的占比分别为 6.0%, 1.9%, 在非真空紫外辐射(200 ~ 4 500 nm) 的最大的占比为 36.3% 和 5%. 为钨极氩弧的紫外光危害性研究提供了理论依据.

**关键词:** 紫外光; 辐射; 焊接电弧; 皮肤癌; 净辐射系数

**中图分类号:** TG 403      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400174

## 0 序 言

众所周知, 阳光中的紫外线是皮肤癌的重要诱因, 其中紫外线 A(315 ~ 400 nm) 可以诱发恶性黑色素瘤, 紫外线 B(280 ~ 315 nm) 可以造成皮肤红斑、细胞 DNA 损伤及相关皮肤癌<sup>[1]</sup>. 目前, 全球约有三百万名焊接从业者, 他们是接触紫外线的第一职业人群. Heltoft 等人<sup>[2]</sup> 对丹麦 4 333 名男性焊工做了长达 25 年(1987 年 ~ 2012 年) 的跟踪调查, 发现长期从事电弧焊的人更易罹患颈部(容易暴露在弧光处) 的皮肤癌. 为了焊工的职业健康, 有必要对焊接等离子体的紫外光辐射属性进行研究.

通常等离子体的辐射属性是通过计算获得的, 这是因为在实验室条件下很难获得完全均一、等温的电弧<sup>[3]</sup>. 过去人们更多关注焊接效能, 因此电弧辐射常被看作是一个能量损失项, 研究者计算了一些焊接等离子体的辐射属性(单位体积、单位立体角的辐射能), 如 Ar, Ar-Fe, Ar-Al, Ar-Cu 等离子体等<sup>[4-6]</sup>, 但这实际是全谱的辐射属性. 目前, 关于紫外线 A, B 辐射属性的计算未见报道.

相对于熔化极气体保护焊, 钨极氩弧焊多为手工操作, 因此是辐射研究的重点. 钨极氩弧焊采用

纯氩作为保护气, 尽管焊接过程中从熔池中会蒸发出一些金属蒸气, 但是由于这些金属蒸气含量极低且分布范围较小, 例如采用 90 A 的钨极氩弧焊时, 工件上方 1 mm 处的铁蒸气摩尔含量仅为 0.075%, 在更远距离处, 铁蒸气含量更低<sup>[7]</sup>. 因此, 不考虑金属蒸气对氩等离子体的影响. 计算了常压下氩等离子体紫外光 A, B 的辐射光谱和净辐射系数, 并分析了它们的自吸收程度, 这为进一步研究钨极氩弧的紫外辐射危害性提供了基础.

## 1 净辐射系数

等离子体辐射属性可以用很多方法来表征, 如 PN 近似法、局部特征法、 $k$  分布法、离散坐标法等<sup>[3]</sup>, 但目前使用最广泛的方法是净辐射系数法. 净辐射系数由 Lowke<sup>[8]</sup> 在 1974 年提出, 假定等离子体为一个半径为  $R_p$  的均质、等温球体, 净辐射系数  $\varepsilon_N$  指从球心处释放的单位体积、单位立体角的能量与被该球体吸收的能量的差值. 它可以表示为<sup>[8]</sup>

$$\varepsilon_N(T, R_p) = \int_0^\infty B_\lambda(T) \cdot K'_\lambda(T) \cdot \exp(-K'_\lambda(T) \cdot R_p) \cdot d\lambda \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为波长;  $B_\lambda(T)$  为 Planck 函数;  $R_p$  为等离子体半径;  $K'_\lambda(T)$  为光谱吸收系数. 根据 Kirchhoff 定律<sup>[4]</sup>,  $K'_\lambda(T) = \varepsilon_\lambda(T) / B_\lambda(T)$ , 其中  $\varepsilon_\lambda$  为光谱辐射系数.

式(1) 计算的是实际全谱的净辐射系数, 其波

长范围为  $(0, \infty)$ . 对某一波段进行积分,可以得到该波段的净辐射系数. 对于氩等离子体, 35 nm 以下和 4 500 nm 以上的辐射极小<sup>[9]</sup>, 因此 35 ~ 4 500 nm 的积分可以认为是全谱的净辐射系数, 而 315 ~ 400 nm、280 ~ 315 nm 的积分是紫外光 A、B 的净辐射系数.

净辐射系数法综合考虑了等离子体的辐射和自吸收. 当  $R_p = 0$  时, 等离子体无自吸收; 随着  $R_p$  增加, 自吸收程度增大. 但当  $R_p > 1$  min 时, 增大的幅度较小.

## 2 氩等离子体辐射机制

对于焊接氩弧而言, 电弧最高温度一般不超过 25 000 K<sup>[4]</sup>, 操作环境多为常压. 此时,  $\text{Ar}^{3+}$  及带有更高电荷的离子数量很少<sup>[4]</sup>, 因此只考虑  $\text{Ar}$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}^{2+}$  和  $e^-$  等四种粒子, 计算的温度范围为 5 000 ~ 25 000 K, 压强为 0.1 MPa. 为了计算净辐射系数  $\varepsilon_N(T)$ , 需要求出不同波长的光谱辐射系数  $\varepsilon_\lambda(T)$ .

### 2.1 线谱辐射

当原子或离子中的自由电子从较高的激发态跃迁到基态时, 会产生线谱辐射. 文中考虑了 35 ~ 4 500 nm 波长范围内  $\text{Ar}$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}^{2+}$  的 2 754, 6 753, 1 059 条线谱. 谱线特征 (能级、量子数、跃迁几率) 取自美国 NIST 原子线谱数据库和德国 Kurucz 数据库. 线谱的光谱辐射系数  $\varepsilon_\lambda^{\text{line}}$  为<sup>[6]</sup>

$$\varepsilon_\lambda^{\text{line}}(T) = \frac{hc}{4\pi\lambda_{ij}} \cdot A_{ij} \cdot n_i(T) \cdot P_{ij}^{\text{Voigt}}(\lambda) \quad (2)$$

式中:  $A_{ij}$  为电子从  $i$  能级到  $j$  能级的跃迁几率;  $\lambda_{ij}$  为线谱的中心波长;  $h$  为普朗克常量;  $c$  为光速;  $P_{ij}^{\text{Voigt}}(\lambda)$  为谱线的线型;  $n_i$  为氩原子或离子的数密度, 该数据取自文献 [4].

谱线线型  $P_{ij}^{\text{Voigt}}(\lambda)$  由各种展宽机制决定. 粒子间的多普勒效应可以产生多普勒展宽, 其线型为高斯型. 发射体与周围粒子相互作用会产生形状为洛伦兹线型的洛伦兹展宽. 多普勒展宽与洛伦兹展宽叠加可以产生 Voigt 展宽. Voigt 展宽的线型表达式为<sup>[4]</sup>

$$P_{ij}^{\text{Voigt}}(\lambda) = \frac{2\ln 2}{\delta\lambda_D^2} \cdot \frac{\delta\lambda_L}{\pi^{3/2}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-x^2)}{\left(\sqrt{\ln 2} \frac{\delta\lambda_L}{\delta\lambda_D}\right)^2 + (x-y)^2} dx \quad (3)$$

式中:  $y = \frac{2\ln 2}{\delta\lambda_D^2} \cdot (\lambda - \lambda_{ij})$ ;  $\delta\lambda_D$  和  $\delta\lambda_L$  分别为多普勒展

宽和洛伦兹展宽的半高全宽, 它们的计算参考文献 [5].

等离子体辐射存在自吸收效应. 人们通常采用逃逸系数法来处理线谱的自吸收. 假定等离子体为半径为  $R_p$  的等温、均质球体, 逃逸系数<sup>[3]</sup>指从球体中释放出线谱辐射与无自吸收时的线谱辐射的比值, 其数值在 0 ~ 1 之间. 但是, 该方法未考虑线谱的叠加, 因此会使计算结果偏大<sup>[3]</sup>. 为了更精确地计算辐射光谱, 采用 Menart 等人提出 Line-by-line 方法<sup>[9]</sup> 去掉了线谱叠加部分的辐射.

### 2.2 连续谱辐射

复合辐射: 自由电子被离子俘获形成新的处于激发状态的离子或原子, 复合过程产生的能量以光子形式释放. 复合辐射的光谱辐射系数  $\varepsilon_\lambda^{\text{rec}}$  为<sup>[5]</sup>

$$\varepsilon_\lambda^{\text{rec}}(T) = C_1 \cdot \left(\frac{c}{\lambda^2}\right) \cdot \frac{n_e(T)n_{z^+}(T)}{Q_{z^+}(T)} \cdot \frac{Z_{z^+}^2}{\sqrt{T}} \left[1 - \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k_B T}\right)\right] \cdot g_1^{z^+} \cdot \xi_\lambda^{z^+(z-1)^+}(T) \quad (4)$$

式中:  $C_1$  为常数 ( $C_1 = 5.44 \text{ J} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{1/2}/\text{sr}$ );  $Z_{z^+}$  为离子  $A_{i,p}^z$  的带电个数;  $n_e$  和  $n_{z^+}$  分别为电子和离子的数密度;  $Q_{z^+}$  和  $g_1^{z^+}$  分别为离子  $A_{i,p}^z$  的内配分函数和基态能级简并度;  $\xi_\lambda^{z^+(z-1)^+}$  为 Biberman 系数.

韧致辐射: 当高速运动的电子经过离子附近, 会受到电场的作用, 从某一自由态变为另一能量更低的自由态, 能量差以光子形式表现出来. 电子-离子以及电子-原子相互作用的光谱辐射系数分别为<sup>[5]</sup>

$$\varepsilon_\lambda^{\text{ea}}(T) = C_2 \cdot \left(\frac{c}{\lambda^2}\right) \cdot n_a(T) \cdot n_e(T) \cdot T^{3/2} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) \cdot G_{\text{ea},\lambda}(T) \quad (5)$$

$$\varepsilon_\lambda^{\text{ei},z^+}(T) = C_1 \cdot \left(\frac{c}{\lambda^2}\right) \cdot Z_{z^+}^2 \cdot \frac{n_{z^+}(T) \cdot n_e(T)}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) \cdot G_{\text{ei},\lambda}^{z^+}(T) \quad (6)$$

式中:  $C_2$  为常数 ( $C_2 = 3.42 \times 10^{-43} \text{ J} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-3/2}/\text{sr}$ );  $n_a$  为原子数密度;  $G_{\text{ei},\lambda}^{z^+}(T)$  和  $G_{\text{ea},\lambda}(T)$  分别为原子和分子的 Gaunt 修正因子.

## 3 结果与讨论

### 3.1 氩离子体辐射光谱

根据氩等离子体的各种辐射机制可以计算出其辐射光谱. 以 15 000 K 为例, 图 1 给出了其全谱

(35 ~ 4 500 nm) 和紫外光谱 (35 ~ 400 nm). 在可见光和红外光区, 强线谱集中在 600 ~ 1 800 nm 范围内; 在紫外光范围内, 强线谱集中在 40 ~ 120 nm; 紫外光 A (315 ~ 400 nm)、紫外光 B (280 ~ 315 nm) 以连续谱为主, 线谱很少.

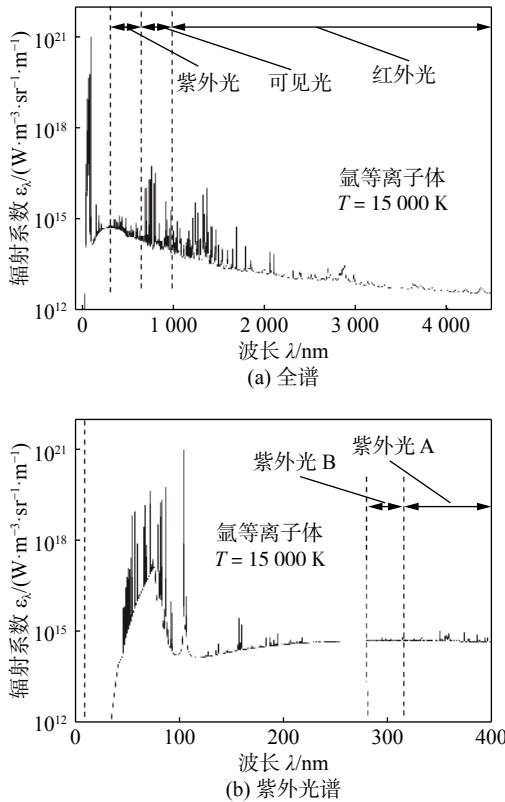


图 1 0.1 MPa, 15 000 K 时氩等离子光谱辐射系数 (不考虑自吸收)  
Fig. 1 Spectral spectrum for an argon plasma at 0.1 MPa and 15 000 K (without self-absorption)

尽管 40 ~ 120 nm 波段辐射极强, 但是由于该波段属于真空紫外光区 (10 ~ 200 nm), 真空紫外光会被空气中强烈吸收<sup>[10]</sup>, 只有非真空紫外光 (200 ~ 4 500 nm) 才有可能照射到焊工身上.

### 3.2 净辐射系数

图 2 给出了  $R_p = 0$  mm 时 (无自吸收) 紫外光 A (315 ~ 400 nm)、紫外光 B (280 ~ 315 nm)、非真空紫外光 (200 ~ 4 500 nm) 以及全谱 (35 ~ 4 500 nm) 的净辐射系数. 为了验证计算的准确性, 文中比较了全谱净辐射系数与 Cressault 等人的计算结果<sup>[5]</sup>, 两者吻合良好, 说明计算是正确的. 从图中还可以看出, 随着温度升高, 各谱段的辐射都有增加; 全谱的净辐射系数要远大于其它谱段的净辐射系数; 紫外光 A 的净辐射系数要大于紫外光 B.

为了评价各谱段的自吸收程度, 图 3 给出了它

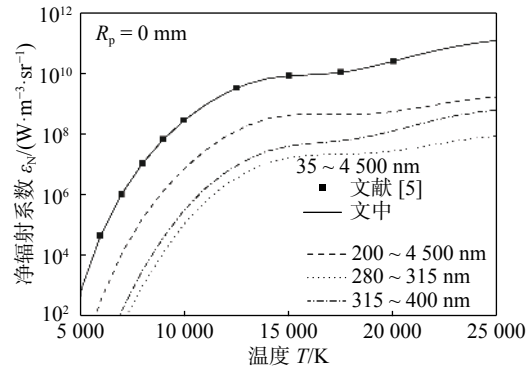


图 2 不同波段的净辐射系数 (无自吸收)  
Fig. 2 NECs for different spectral intervals (without self-absorption)

们的净辐射系数在  $R_p = 1$  mm 和  $R_p = 0$  mm (无自吸收) 时的比值. 如图所示, 全谱辐射 (3 500 ~ 4 000 nm) 存在强烈的自吸收, 在 17 000 K 时只有 23% 的能量可以从半径为 1 mm 的等离子体中辐射出去, 在其它温度下吸收作用更强, 而非真空紫外光, 特别是紫外光 A、紫外光 B, 其相对吸收率接近 100%, 这意味着它们几乎不存在自吸收现象.

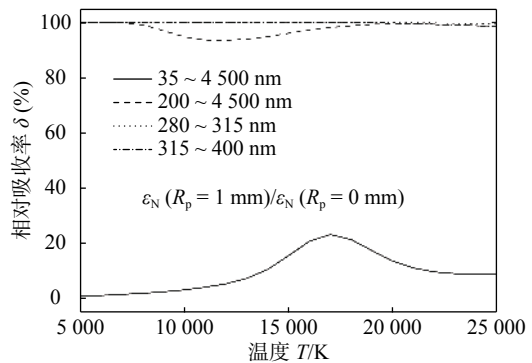


图 3 不同波段辐射的吸收程度  
Fig. 3 Absorption degrees for different spectral intervals

### 3.3 紫外光 A, B 在辐射中的占比

图 4 为不同等离子体半径  $R_p$  下紫外光 A (315 ~ 400 nm)、紫外光 B (280 ~ 315 nm) 在总谱 (35 ~ 4 500 nm) 中的占比. 如图所示, 当  $R_p = 0$  mm 时, 紫外光 A 在总辐射中的占比不到 0.6%, 紫外光 B 则不到 0.3%; 当  $R_p = 1$  mm 时, 紫外光 A、B 在总谱中的占比有很大提升, 紫外光 A 在 12 000 和 24 000 K 出现两个峰值, 其占比分别达到 4.8% 和 6.0%, 紫外线 B 的峰值出现在 12 000 K, 其占比为 1.9%, 紫外光 A、B 占比提升的原因是因为随着  $R_p$  的增加总谱辐射急剧降低而紫外光 A、B 基本不变.

图 5 为不同等离子体半径  $R_p$  下紫外光 A、B

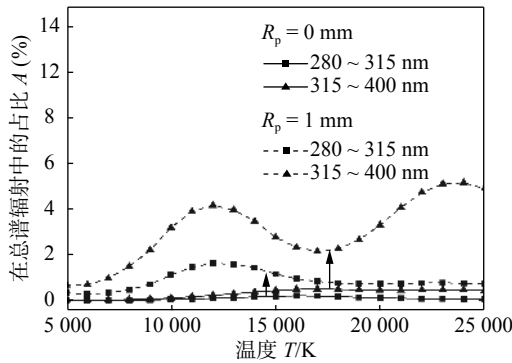


图 4 紫外光 A, B 在总谱中的占比

Fig. 4 Contributions of the UVA and UVB radiation to the entire spectrum (35 ~ 4 500 nm) radiation

在非真空紫外谱 (200 ~ 4 500 nm) 中的占比. 由于紫外光 A, B 和非真空紫外辐射自吸收效应都极小, 紫外光 A, B 在  $R_p = 1$  mm 和  $R_p = 0$  mm 时它们在非真空紫外辐射中的占比基本一致; 随着温度上升, 紫外光 A 的占比不断增加, 25 000 K 时达到最大值 36.3%, 而紫外光 B 的占比在 17 000 ~ 25 000 K 较大, 其值保持在 5.0%.

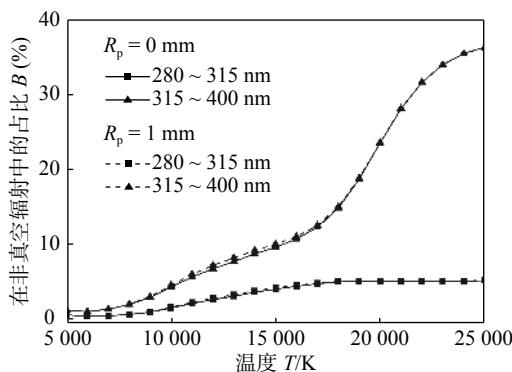


图 5 紫外光 A, B 在非真空紫外谱中的占比

Fig. 5 Contributions of the UVA and UVB to the non-vacuum UV spectrum (35 ~ 4 500 nm)

## 4 结 论

(1) 计算了 0.1 MPa 下 5 000 ~ 25 000 K 范围内氩等离子体的全谱、非真空紫外光、紫外光 A、紫外光 B 的净辐射系数.

(2) 随着温度上升, 上述各谱段的净辐射系数均有所上升; 紫外光 A 的净辐射系数始终大于紫外光 B.

(3) 随着等离子体半径  $R_p$  增加, 全谱辐射存在强烈的自吸收, 而非真空紫外光, 特别是紫外光 A, B, 几乎无自吸收.

(4) 当  $R_p = 0$  mm 时 (无自吸收), 紫外光 A, B 在总辐射中的占比不到 0.6%, 0.3%, 当  $R_p = 1$  mm 时, 其最大的占比分别增加至 6.0%, 1.9%; 紫外光 A, B 在非真空紫外辐射的占比则基本不受  $R_p$  变化的影响, 其最大的占比分别为 36.3% 和 5.0%.

## 参考文献:

- [1] Armstrong B K, Krickler A. The epidemiology of UV induced skin cancer[J]. Journal of Photochemistry & Photobiology B Biology, 2001, 63(1): 8 - 18.
- [2] Heltoft K N, Slagor R M, Agner T, *et al.* Metal arc welding and the risk of skin cancer[J]. International Archives of Occupational & Environmental Health, 2017, 1(3): 1 - 9.
- [3] Cressault Y. Basic knowledge on radiative and transport properties to begin in thermal plasmas modelling[J]. AIP Advances, 2015, 5: 25 - 44.
- [4] Boulos M I, Fauchais P, Pfender E. Thermal plasmas: fundamentals and applications, Vol. 1[M]. New York: Plenum Press, 1994.
- [5] Cressault Y, Gleizes A. Thermal plasma properties for Ar-Al, Ar-Fe and Ar-Cu mixtures used in welding plasmas processes: I. Net emission coefficients at atmospheric pressure[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(41): 415206.
- [6] Menart J, Malik S. Net emission coefficients for argon-iron thermal plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2002, 35(9): 867 - 874.
- [7] Gonzalez J J, Bouaziz M, Razafinimanana M, *et al.* The influence of iron vapour on an argon transferred arc[J]. Plasma Sources Science and Technology, 1997, 6(1): 20 - 28.
- [8] Lowke J J. Predictions of arc temperature profiles using approximate emission coefficients for radiation losses[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1974, 14(2): 111 - 122.
- [9] Menart J, Heberlein J, Pfender E. Line-by-line method of calculating emission coefficients for thermal plasmas consisting of monoatomic species[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1996, 56(3): 377 - 398.
- [10] Gallagher R P, Lee T K. Adverse effects of ultraviolet radiation: A brief review[J]. Progress in Biophysics & Molecular Biology, 2006, 92(1): 119 - 131.

第一作者简介: 王飞, 男, 1986 年出生, 博士. 主要从事焊接电弧诊断、计算和模拟研究. 发表论文 10 余篇. Email: wangfei2012@tju.edu.cn

通信作者简介: 李桓, 男, 博士, 教授, 博士研究生导师. Email: lihuan@tju.edu.cn