

辐射测温中光谱发射率的表征描述

符泰然¹, 程晓舫², 钟茂华¹, 杨臧健²

1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029

2. 中国科学技术大学, 热科学和能源工程系, 安徽 合肥 230027

摘要 实际物体的光谱发射率表现复杂, 给辐射测温的深入研究和实际应用带来了许多困难和不确定性, 发射率问题即成为了辐射测温研究中的关键点。文章基于光谱发射率的泰勒多项式展开、波长的无量纲参数、弯曲度指数等分析, 描述了谱色测温法中光谱发射率的数学表征, 建立了窄波段内的光谱发射率通用函数形式。并通过对不同温度下几种金属的实际光谱发射率进行拟合分析, 对此给予了实验上的验证, 表明了所提出光谱发射率模型具有应用的适用性, 该模型是谱色测温方法应用研究的基础。

关键词 辐射测温; 光谱发射率; 温度; 谱色测温

中图分类号: O432.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2008)01-0001-05

引言

温度在科学研究和工程技术中属于重要的测量要素。建立在普朗克定律基础上的辐射测温方法具有凸显地位。自从1900年普朗克揭示了黑体辐射的基本理论后, 至今该理论一直直接被应用于辐射传热、辐射测温、色度测量等多种领域的理论和应用研究中。普朗克黑体辐射理论非常简洁, 但它描述的是理想黑体辐射, 在应用中必须涉及实际物体的发射率, 而实际物体的发射率表现复杂, 给深入研究和实际应用带来了许多困难和不确定性, 发射率问题即成为了辐射测温研究的关键点之一。Touloukian(20世纪70年代)、Jean-Francois(20世纪80年代)等对常见的几十种金属、非金属及合金的发射率进行了实验测量^[1], 研究总结了不同温度、波长下的物体光谱发射率特性, 然而实验测量有其固有的局限性, 实验资金投入高, 操作过程复杂, 同时实验得出的发射率数据并不具有应用共性, 远远不能涵盖辐射测温所关心的测量情形。从国内外的研究文献来看, 在辐射测温研究中, 对发射率问题的处理主要分为发射率数值法(不考虑发射率与温度、波长的具体相关形式, 在测量中把其看做一个数值)和发射率函数法(构造发射率关于温度、波长的函数)两类方法, 由此衍生出众多的辐射测温方法与技术^[2-10], 尤其是针对于后者的研究, 使得采用发射率函数构造的辐射测温具有了应用的广泛性。基于本课题组已提出的谱色测温方法, 本文将着重阐述谱色测温法中光谱发射率的数学表征形式, 为谱色测温理论研究的深化和技术应用的实现提供必要

的基础^[11-14]。

1 光谱发射率的泰勒多项式展开

实际物体辐射的复杂性被归结为发射率的光谱复杂性和方向复杂性, 发射率的光谱性是辐射测温研究中最关键的问题。对于连续辐射的物体, 其光谱发射率 $\epsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta)$ 必然是波长的连续函数, 往往表现为波长的复杂曲线。设局部范围内的光谱发射率满足如下要求。

(1) $\epsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta)$ 在波长 λ_0 的某邻域波段 $|\lambda - \lambda_0| < \delta$ 内有定义;

(2) $\epsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta)$ 在此邻域波段内具有直至 $n+1$ 阶的关于波长 λ 的导数

$$\epsilon'(\lambda, T, \theta, \phi, \beta), \epsilon''(\lambda, T, \theta, \phi, \beta), \dots, \epsilon^{(n+1)}(\lambda, T, \theta, \phi, \beta)$$

则根据泰勒定理, $\epsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta)$ 在波长 λ_0 的邻域波段 $|\lambda - \lambda_0| < \delta$ 内可按 $\lambda - \lambda_0$ 的方幂展开成 n 阶泰勒多项式

$$\begin{aligned} \epsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta) &= \epsilon(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta) + \\ &\epsilon(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)(\lambda - \lambda_0) + \\ &\frac{1}{2}\epsilon''(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)(\lambda - \lambda_0)^2 + \dots + \\ &\frac{1}{n!}\epsilon^{(n)}(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)(\lambda - \lambda_0)^n + O_n(\lambda) \end{aligned} \quad (1)$$

其中余项 $O_n(\lambda) = \frac{1}{(n+1)!}\epsilon^{(n+1)}(\xi, T, \theta, \phi, \beta)(\lambda - \lambda_0)^{n+1}$, 而 ξ 属于该邻域波段。式(1)能够精确表征实际物体的真实光

收稿日期: 2006-05-10, 修订日期: 2006-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50606033)资助

作者简介: 符泰然, 1978年生, 中国安全生产科学研究院工程师

e-mail: futr@chinasafety.ac.cn

谱发射率。

定义邻域 $(\lambda_0, \lambda_0 + \delta)$ 内的无量纲波长 $\Lambda = \frac{\lambda - \lambda_0}{\delta}$ $\in (0, 1)$, 改写式(1),

$$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta) &= \varepsilon(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta) + \\ &\varepsilon'(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)\delta \cdot \Lambda + \\ &\frac{1}{2}\varepsilon''(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)\delta^2 \cdot \Lambda + \dots + \\ &\frac{1}{n!}\varepsilon^{(n)}(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)\delta^n \cdot \Lambda^n + O_n(\Lambda) \end{aligned} \quad (2)$$

微商 $\varepsilon'(\lambda, T, \theta, \phi, \beta)$, $\varepsilon''(\lambda, T, \theta, \phi, \beta)$, \dots , $\varepsilon^{(n+1)}(\lambda, T, \theta, \phi, \beta)$ 有界, 则当 δ 取无穷小量时, $n \geq 2$ 的高阶量及余项 $O_n(\Lambda)$ 均可以忽略, 于是有

$$\varepsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta) = a_0(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta) +$$

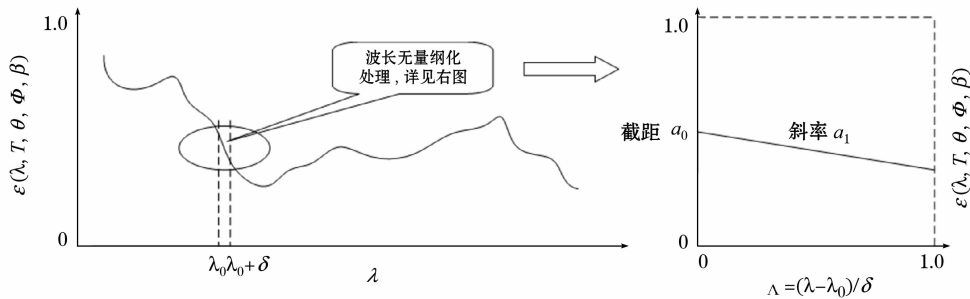


Fig. 1 The example of non-dimension wavelength of emissivity function

根据发射率的物理定义, 其满足

$$0 < \varepsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta) \leq 1 \quad (5)$$

依据式(5), 并结合图 1, 发射率模型中无量纲参数的取值范围为

$$\begin{aligned} 0 < a_0(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta) \leq 1, -1 \leq \\ a_1(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta) \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

因而, 无量纲波长的提出在使参数无量纲化的同时, 也使发射率函数中无量纲参数的数值范围得以明确。

改写式(3)

$$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta) = \\ a_0(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)[1 + m(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)\Lambda] \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $m(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta) = a_1(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)/a_0(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)$, 数值范围为

$$m(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta) \in [-1, +\infty) \quad (8)$$

参数 (a_0, m) 表征了发射率模型的全部数学特性, 不同 m 值的光谱发射率分布如图 2~图 4 所示。

1) $m=0$:

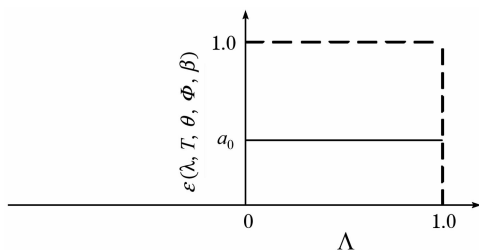


Fig. 2 The curve distribution of the emissivity function

$m=0$

$$a_1(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)\Lambda \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} a_0(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta) &= \varepsilon(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta), \\ a_1(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta) &= \varepsilon'(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)\delta \end{aligned} \quad (4)$$

式(3)描述了局部波长区间内的光谱发射率的分布, 该分析表明: 在窄波段内, 光谱发射率可以用波长的线性函数予以表征。

2 无量纲参数

无量纲波长 $\Lambda = \frac{\lambda - \lambda_0}{\delta}$ 的引入, 使得发射率函数中的参数具有与发射率相同的无量纲特征。图 1 为波长无量纲化处理的示例。

2) $m \in [-1, 0)$: $m_1^* < m_2^*$

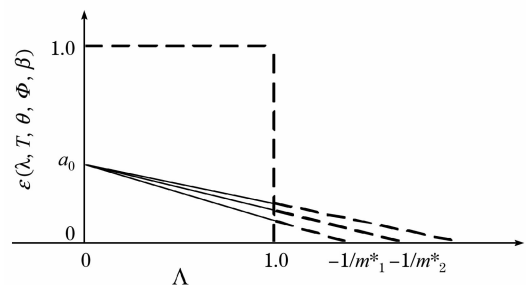


Fig. 3 The curve distribution of the emissivity function

$m \in [-1, 0)$

3) $m \in (0, +\infty)$: $m_1 < m_2$

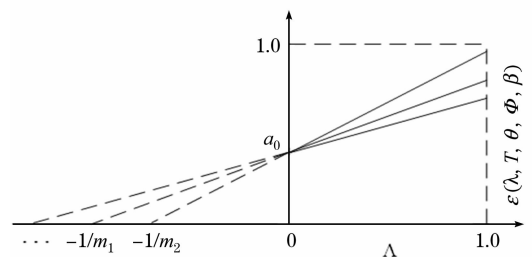


Fig. 4 The curve distribution of the emissivity function

$m \in (0, +\infty)$

3 改进的单调性发射率模型

针对固定的波段区间 (λ_a, λ_b) ，式(3)中的线性发射率模型的适用性往往是有限的，因此引入弯曲度指数 n 来改造式(3)中的发射率模型

$$\varepsilon(\lambda, T, \theta, \phi, \beta) = a_0(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)[1 + m(\lambda_0, T, \theta, \phi, \beta)\Delta^n] \quad (9)$$

其中无量纲波长 $\Delta = (\lambda - \lambda_a)/(\lambda_b - \lambda_a)$ 。

图 5 和图 6 画出 m 属不同范围时的曲线分布。光谱发射率被限定在图 5 和图 6 中的矩形框内，如果我们把矩形框看作它内部所有点组成的一个集合，那么式(9)的模型是该集合的一个分割，通过它可以遍历集合中的所有元素。式(9)的发射率模型是对固定的窄波段内发射率所呈现出的单调性的模拟，对于具有简单的单调性质的发射率，通过弯曲度指数的 n 调整，该发射率模型能够较准确地予以表征描述。

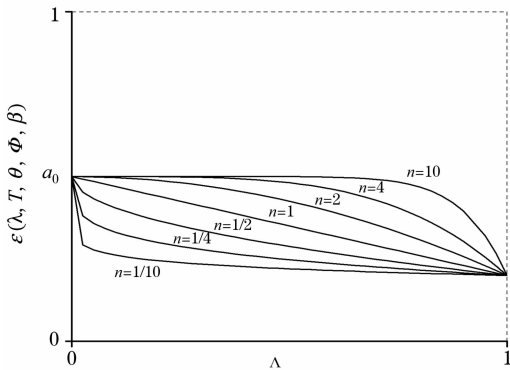


Fig. 5 The curve distribution of the improved emissivity function($m = -0.6$)

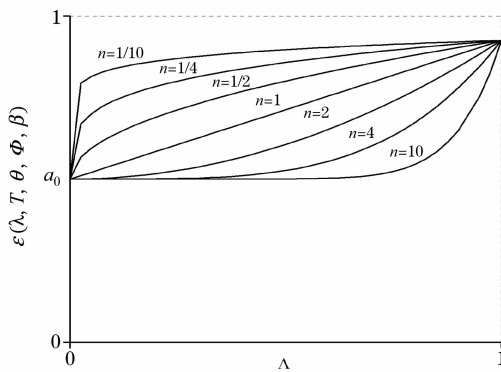


Fig. 6 The curve distribution of the improved emissivity function($m = 0.85$)

4 实际光谱发射率的拟合

以式(9)为模型，采用非线性最小二乘法拟合实际光谱发射率数据，以此评判式(9)的适用性。“最小二乘”要求参数估计使得测量数据和拟合数据之间的残差均方 χ^2 达到最小，残差均方提供了回归方差在特定自由度 DoF 下的一个估

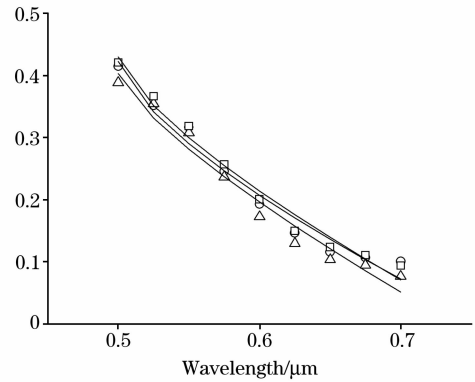


Fig. 7 The fitting curve of the normal spectral emissivity of copper
○: 1 262; □: 1 264; △: 1 326 K

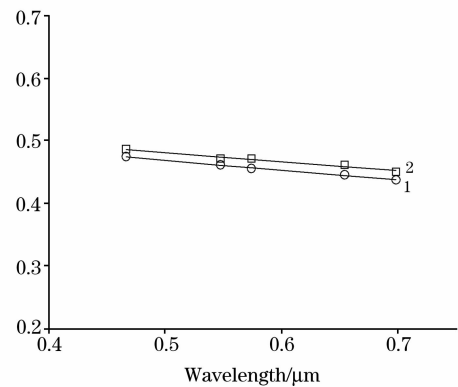


Fig. 8 The fitting curve of the normal spectral emissivity of hafnium
1: 1 510; 2: 1 735 K

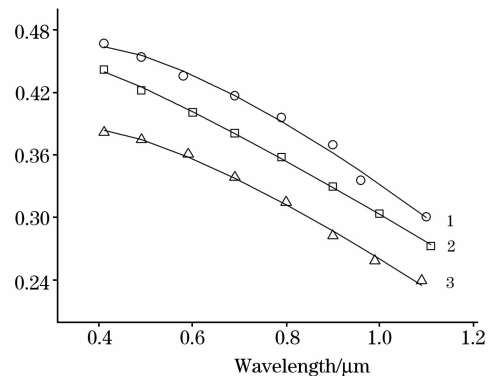


Fig. 9 The fitting curve of the normal spectral emissivity of molybdenum
1: 1 600; 2: 2 000; 3: 2 400 K

计，是误差的一个“量度”。判断拟合模型好坏的一个直观的统计量是相关系数 r ，它越接近 1，则说明拟合得越好。图 7 ~ 图 10 给出了金属和非金属的光谱法向发射率的拟合曲线^[1]，表 1 列出了拟合曲线的参数和统计量。

5 结论

(1) 本文通过光谱发射率的泰勒多项式展开、波长的无

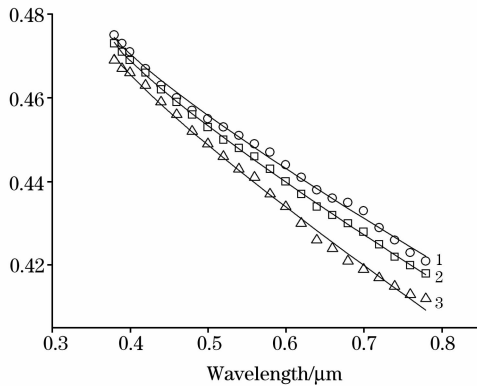


Fig. 10 The fitting curve of the normal spectral emissivity of tungsten

1: 1 600; 2: 2 000; 3: 2 400 K

量纲参数、弯曲度指数等多方面的分析,描述了谱色测温法中光谱发射率的数学表征,建立了窄波段内的光谱发射率的通用函数形式,为谱色测温方法的应用研究提供了必要的理论基础。

(2)对不同温度下的几种金属的实际光谱发射率进行拟合(见表 1),具有高相关系数的拟合结果表明,式(9)给出的单调性发射率模型可以较高精度地拟合单调性质的发射率。

(3)单调发射率模型的拟合与实际还是有差异的,虽然从数学上可以选择具高阶函数或是复杂函数来实现高精度的拟合,例如高阶多项式,但在应用中不予重点考虑,用繁琐的分析来追求有限的精度并非是最好的选择,同时,高阶函数的选择也就意味着辐射测温仪器设计的高复杂性。式(9)的单调发射率模型是谱色测温法研究的基础,它所能涵盖的单调发射率表现的物体即为谱色测温法所适用的测温物体范围。

Table 1 The fitting curve parameters of the normal spectral emissivity

拟合	T, K	a_0	m	N	χ^2	DoF	r
铜	1 262	0.422 94±0.021 34	-0.828 44±0.035 56	0.702 06±0.109 53	0.000 48	6	0.973 41
	1 264	0.403 57±0.024 12	-0.872 06±0.043 03	0.7653 3±0.136 09	0.000 63	6	0.966 52
	1 326	0.430 22±0.018 90	-0.834 05±0.031 32	0.732 83±0.099 48	0.000 38	6	0.9799 6
铪	1 510	0.475 00±0.001 23	-0.076 87±0.003 20	0.934 38±0.088 58	1.523 5E-6	2	0.996 28
	1 735	0.486 59±0.003 14	-0.069 08±0.008 00	0.976 32±0.255 93	9.9354E-6	2	0.972 20
钼	1 600	0.463 91±0.004 79	-0.352 63±0.012 00	1.389 63±0.132 27	0.000 04	5	0.992 45
	2 000	0.439 75±0.001 83	-0.375 83±0.004 25	1.124 48±0.036 97	4.3903E-6	5	0.999 09
	2 800	0.383 77±0.003 31	-0.386 82±0.009 23	1.323 73±0.093 85	0.000 02	5	0.996 05
钨	1 600	0.474 49±0.000 72	-0.110 29±0.001 48	0.856 60±0.031 67	1.0531E-6	8	0.996 48
	2 000	0.473 25±0.000 31	-0.117 29±0.000 63	0.851 67±0.012 63	1.9E-7	8	0.999 43
	2 400	0.470 16±0.000 84	-0.129 48±0.001 72	0.867 53±0.032 28	1.4513E-6	8	0.996 42

参 考 文 献

- [1] Touloukian Y S, et al. Thermal Radiative Properties: Metallic Element and Alloys. New York: Plenum Publishing Co., 1970. 153.
- [2] SUN Xiao-gang, DAI Jing-min, CONG Da-cheng, et al(孙晓刚, 戴景民, 丛大成, 等). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 1998, 17(3): 221.
- [3] SHI De-heng, CHEN Yu-ke(施德恒, 陈玉科). Optical Technology(光学技术), 1999, 25(3): 87.
- [4] Coates P B. Metrologia, 1981, 17: 103.
- [5] Jenkins T P, Hanson R K. Combustion and Flame, 2001, 126(3): 1669.
- [6] Sabel T, Unterberger S, Hein K R G. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2-4): 283.
- [7] Lu G, Yan Y, Riley G, et al. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5): 990.
- [8] Saunders P, White D R. Metrologia, 2003, 40(4): 195.
- [9] Daniel Ng, et al. Rev. Sci. Instrum., 2001, 72(2): 1522.
- [10] Mazikowski A, et al. Infrared Physics and Technology, 2003, 44(2): 91.
- [11] Tairan Fu, Xiaofang Cheng, Xueliang Fan, et al. Metrologia, 2004, 41(4): 305.
- [12] CHENG Xiao-fang, FU Tai-ran, FAN Xue-liang. Science in China, Ser. G(Physics, Mechanics & Astronomy), 2005, 48(2): 142.
- [13] CHENG Xiao-fang, FU Tai-ran, WANG An-quan(程晓舫, 符泰然, 王安全). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2003, 23(4): 641.
- [14] Tairan Fu, Xiaofang Cheng, et al. Measurement Science & Technology, 2006, 17: 379.

Analyses of Spectral Emissivity in Radiation Temperature Measurement

FU Tai-ran¹, CHENG Xiao-fang², ZHONG Mao-hua¹, YANG Zang-jian²

1. China Academy of Safety Science & Technology, Beijing 100029, China

2. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Abstract The complexity of the spectral emissivity of actual surfaces is the key point in the research and applications of radiation temperature measurement, resulting in the difficulty in the achievement of the temperature measurement. In the present paper, based on the discussions of the Taylor expansion, the non-dimension wavelength and the exponent, the authors describe the mathematical expression of the spectral emissivity of actual surfaces, and establish the general spectral emissivity function. Through the fitting of experimental data of the spectral emissivities of different metals at different temperatures, the applicability of the spectral emissivity function is verified which especially becomes the fundamental in the research of primary spectrum pyrometry.

Keywords Radiation temperature measurement; Spectral emissivity; Temperature; Primary spectrum pyrometry

(Received May 10, 2006; accepted Aug. 20, 2006)



野田勇夫 (Isao Noda)

野田勇夫 1951 年生于日本东京, 日本国籍(在美国有永久居住权)。

1974 年在美国纽约哥伦比亚大学获得学士学位, 1976 年获得生物工程硕士学位, 1979 年又从哥伦比亚大学获得化工博士学位, 1997 年在日本东京大学获得理学博士学位。1978 年起, 在美国宝洁(Procter and Gamble)公司工作, 1994 年至今为该公司研究员。他的研究领域是高分子科学和光谱学, 他因研究二维红外相关光谱而出名。他同时活跃于研究新型生物可降解塑料领域并开发专利产品 Nodax™。

他是 1991 年美国应用光谱学会 William F Meggers 奖获得者; 2002 年 Coblenz 学会 William-Wright 奖获得者。2002 年荣任中国清华大学生物科学学院客座教授。现任《光谱学与光谱分析》编辑顾问。

他被美国化学会辛辛那提分会选为 2005 年度化学家。他是美国化学会、美国化工学会、美国物理学会、Coblenz 学会、日本红外-拉曼学会, Phi Lambda Upsilon, Sigma Xi、美国应用光谱学会、日本高子科学学会会员。

他在欧洲转让 23 项专利, 在美国转让 53 项专利; 发表学术论文 214 篇; 出版 3 部专著。1982~2007 年间在各种不同大会报告 94 次, 邀请报告 133 次。在不同期刊、大学、会议荣誉职务 17 个。在美国、德国等不同会议上获 5 次优秀论文奖。