

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.03.009

蒙特卡洛法在高温背景辐射下比色测温的应用研究

熊丹枫¹, 刘纯红¹, 吴海滨², 张乐文²

(1 合肥师范学院物理与材料工程学院, 安徽 合肥 230601;

2 安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 在比色测温中, 高温背景辐射对准确测量目标温度有很大的干扰, 利用蒙特卡洛法通过概率分布模拟背景辐射的发射位置、辐射方向和反射或吸收特性, 统计被测量目标反射并被探测器检测到的辐射能束, 与理论辐射差值相比较, 检验其准确性。在此基础上, 提出一种在复杂环境下消除高温背景辐射影响、提高测温精度的方法。

关键词: 高温背景; 蒙特卡洛法; 辐射能束; 测温精度

中图分类号: O432.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)03-0235-06

Application of Monte Carlo Method in Colorimetric Temperature Measurement Under High Temperature Background Radiation

XIONG Danfeng¹, LIU Chunhong¹, WU Haibin², ZHANG Lewen²

(1 School of Physics and Materials Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, China;

2 School of Physics and Materials Science, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In colorimetric temperature measurement, high temperature background radiation interferes with the accurate measurement of target temperature. Monte Carlo method is used to simulate the emission position, radiation direction, reflection and absorption characteristics of background radiation by probability distribution. The radiant energy beam reflected by the target was detected by the detector and compared with the theoretical radiation difference to verify its accuracy. On this basis, a method that can eliminate the influence of high-temperature background radiation in a complex environment and improve the accuracy of temperature measurement is proposed.

Key words: high temperature background; Monte Carlo method; radiant energy beam; temperature measurement accuracy

基金项目: Supported by Open Project of the Research Center of the Photoelectric Sensing Engineering Technology in Anhui Province (安徽省光电感测工程技术研究中心开放课题, 01001567-201604)

作者简介: 熊丹枫 (1990 -), 男, 安徽明光人, 硕士研究生, 助理实验师, 主要从事光电检测方面的研究。

E-mail: 1012614977@qq.com

收稿日期: 2018-08-14; **修改日期:** 2018-10-27

1 引言

在冶金、化工行业中, 温度检测对生产过程、设备故障在线诊断和安全保护、产品质量检测与控制等具有极其重要的意义。在实际应用中, 被测目标往往处于高温烟气及介质燃烧、背景辐射等复杂热环境中, 比色测温技术利用热辐射物体在两个波长下的光谱辐射照度之比与温度之间的函数关系测量温度, 可较好地消除大气吸收及被测物体发射率等影响^[1]。当背景温度高于被测目标温度, 直接采用比色测温公式所计算出的结果偏差极大, 本文以热辐射理论为依据, 结合蒙特卡洛方法, 重点分析热辐射能束的传播轨迹, 统计被测目标反射并被探测器接收到的能束数量, 减小背景辐射对被测目标自身热辐射量的影响, 有效地提高了测温精度。

2 蒙特卡洛法有关概率分布的研究

利用蒙特卡洛法将高温背景表面的辐射能量看作是由许多能束所组成, 根据辐射特性随机模拟辐射能束的发射位置及方向, 判断该能束的入射点是否在被测目标表面上, 假如在被测目标上, 可能被吸收或被反射及反射的方向等都是根据表面反射特性随机模拟或光线传播定律确定, 根据发射方向判断反射能束能否被探测器检测到^[2]。追踪每一个能束的飞行轨迹, 统计被测目标反射并被探测器检测到的能束数量。

2.1 发射位置的概率分布

假设背景环境表面发射的辐射能 $E(T, \lambda)$

$$E(T, \lambda) = \oint \sigma_0 T^4 dA = \int_a^b \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} \varepsilon \sigma_0 T^4 dy dx, \quad (1)$$

式中 σ_0 为斯忒藩 - 波尔兹曼常数, 令 $E_j(x) = \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} \sigma_0 T^4 dy$, 辐射能束的发射位置 x 坐标方向位于 a 与 x 之间的概率 $R(x)$ 为

$$R_x = \frac{\int_a^x E_j(x) dx}{E(T, \lambda)}, \quad (2)$$

发射能束 x 坐标位置以随机数 R_x 为变量的方程为

$$x = x(R_x), \quad (3)$$

同理, 应用方程得到辐射能束 y 坐标的位置

$$R_y = \frac{1}{E_j(x)} \int_{y_1(x)}^y \varepsilon \sigma_0 T^4 dy, \quad (4)$$

$$y = y(R_y, x). \quad (5)$$

由式 (5) 可知辐射能束的发射位置 y 坐标不仅仅依赖于随机数 R_y , 还与所确定的 x 坐标有关, 具体形式如图 1 所示。

2.2 发射方向的概率分布

已知发射位置和波长的半球辐射如图 2 所示。由以上发射位置概率分布可得出

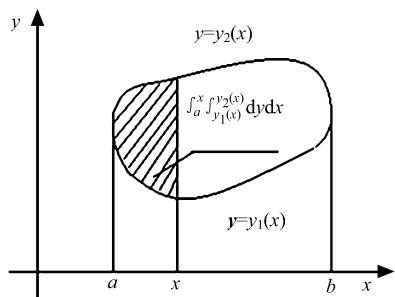


图 1 辐射能束发射位置平面

Fig.1 Radiant energy beam emission position plane

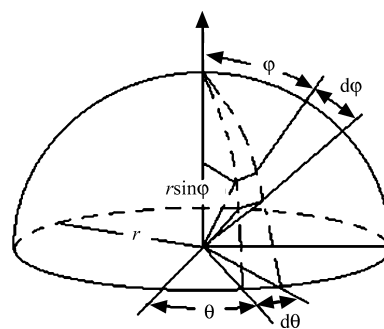


图 2 辐射能束发射方向示意图

Fig.2 Schematic diagram of emission direction of radiant energy beam

$$R_{\theta} = \frac{E_{b\lambda}}{\pi E_{\lambda}} \int_0^{\theta} \int_0^{\pi/2} \varepsilon'_{\lambda} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta} \int_0^{\pi/2} \frac{\varepsilon'_{\lambda}}{\varepsilon_{\lambda}} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi d\theta \quad (6)$$

$$R_{\varphi} = \frac{\int_0^{\theta} \varepsilon'_{\lambda} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi d\theta}{\int_0^{\pi/2} \varepsilon'_{\lambda} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi d\theta} \quad (7)$$

多数实际物体的辐射表面按空间方向的分布是趋向于各向同性, 发射率可以认为与球坐标 θ 方向无关, 这种情况下, $\varepsilon_{\lambda} = 2 \int_0^{\pi/2} \varepsilon'_{\lambda} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi$, 式 (6) 可以简化为

$$R_{\theta} = \frac{\theta}{2\pi}, \quad (8)$$

同时, 辐射能束 φ 方向的选择也与 θ 方向无关^[3]。对于一般漫辐射表面, 式 (7) 可简化为

$$R_{\varphi} = \sin^2 \varphi. \quad (9)$$

2.3 能束吸收与反射概率计算

经研究, 并不是所有高温背景的辐射能束到达低温被测目标表面都被其反射, 当能束落在低温目标表面时, 需找到一个能束到达该表面时是否被表面吸收的判定条件, 这可以利用表面吸收率 α 来作为判定标准。取随机数 R_{α} , 当满足条件 $R_{\alpha} \leq \alpha$ 时, 可以认为能束将被表面吸收, 否则将被反射, R_{α} 是 [0,1] 区间均匀分布的随机数^[4]。对于被表面反射的能束, 当表面符合镜面反射特性时, 可根据镜面反射原理求解反射能束的方向; 如果表面的反射特性符合漫反射特性, 则把入射点当成重新发射点继续采用蒙特卡洛方法进行随机模拟^[5]。

3 建立高温背景辐射模型

采用近红外探测器对低温目标在高温环境下的辐射量和反射量进行采集, 如图 3 所示。令探测器探测到的信号为 M , 其中低温目标自身热辐射量为 M_o , 反射量为 M_r , 则满足

$$M = M_o + M_r. \quad (10)$$

从图 3 可知, 探测器探测到的信号实际上包含两部分, 一是低温目标自身的热辐射量, 另一部分是外

部高温环境的热辐射被低温目标反射量^[6],这部分是干扰信号,利用蒙特卡洛法剔除掉,计算流程如图4所示。

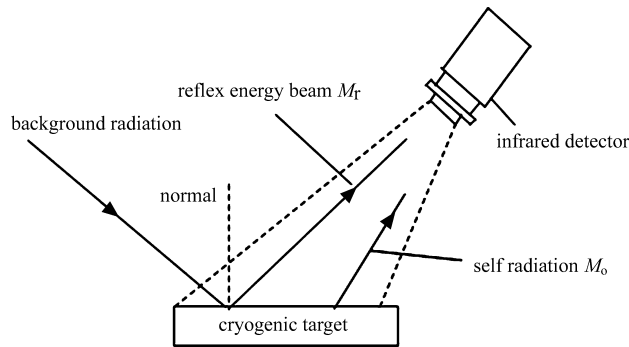


图3 热辐射信号探测示意图

Fig.3 Schematic diagram of thermal radiation signal detection

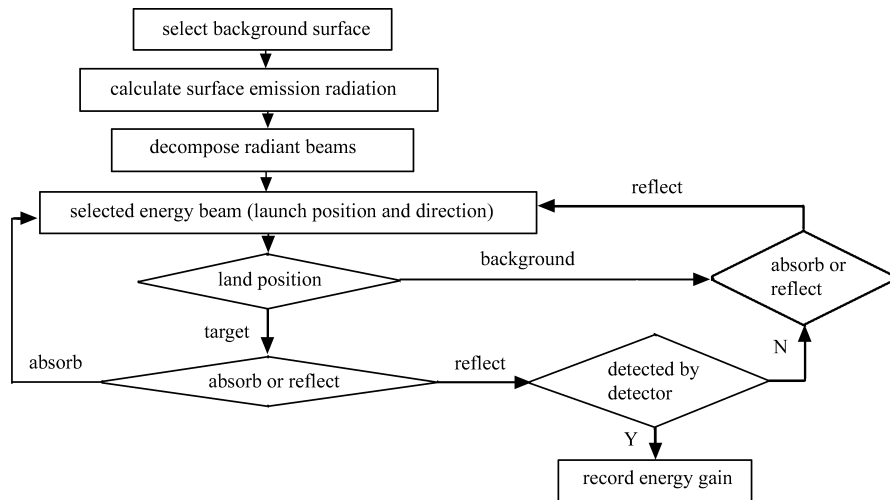


图4 蒙特卡洛计算流程图

Fig.4 Monte Carlo calculation flow chart

据实验研究,碳化硅的辐射率高达0.8以上,在780 nm和850 nm两个波长的比辐射率接近1,如表1所示。

以碳化硅为被测目标,利用比色测温技术在两波长为780 nm和850 nm测量出碳化硅的温度,代入普朗克公式得到780 nm对应温度的辐射出射度,计算辐射理论差值^[7]。然后利用蒙特卡洛法模拟100万次能束发射情况,统计并记录被碳化硅表面反射并被探测器检测到的辐射能束数量,如表2和图5所示。

从图5可以看出,蒙特卡洛法统计的辐射能束和辐射理论差值两者差距很小,且变化趋势相同,随着温度越高,背景辐射的影响越大。

表 1 碳化硅辐射率

Table 1 Silicon carbide emissivity

Temperature(K)	780 nm radiation ratio	850 nm radiation ratio	Emissivity
800	0.7667	0.7568	0.9871
810	0.7651	0.8073	1.0551
820	0.8110	0.8113	1.0004
830	0.8235	0.7905	0.9599
840	0.8311	0.8297	0.9983
850	0.8247	0.8549	1.0366
860	0.8574	0.8343	0.9730
870	0.8319	0.8321	1.0003
880	0.8434	0.8262	0.9800
890	0.8350	0.8732	1.0458
900	0.8388	0.8593	1.0245

表 2 蒙特卡洛模拟辐射能束

Table 2 Monte Carlo simulation of radiant energy beam

Black body furnace setting temperature (K)	Radiation emission (W/m ²)	Silicon carbide measurement temperature (K)	Radiation emission (W/m ²)	Theoretical difference (W/m ²)	Energy statistics (W/m ²)
800	33877	801	34866	989	712
810	45033	811	46315	1282	908
820	59449	821	61100	1651	1245
830	77956	831	80069	2113	1880
840	101567	841	104254	2687	2043
850	131508	851	134905	3397	3068
860	169256	861	173526	4269	3809
870	216579	871	221915	5337	5089
880	275584	881	282219	6636	6297
890	348771	891	356979	8208	7882
900	439090	901	449193	10103	9781

4 结 论

在石化和冶金高温炉中, 背景温度往往在 1000 °C 以上, 对目标温度的测量精度影响很大。采用蒙特卡洛法分解高温背景的辐射能束, 选定一个背景辐射面, 根据概率分布模拟能束发射位置、方向, 判断该能束能否到达被测目标表面, 比较随机数和表面吸收率判定能束被吸收或被反射, 遵循物质的反射特性跟踪辐射轨迹, 统计被探测器检测到的辐射能束, 结合比色测温公式减去该部分辐射量, 得到被测目标真实

的辐射量,大大降低背景辐射的影响,提高测温精度。

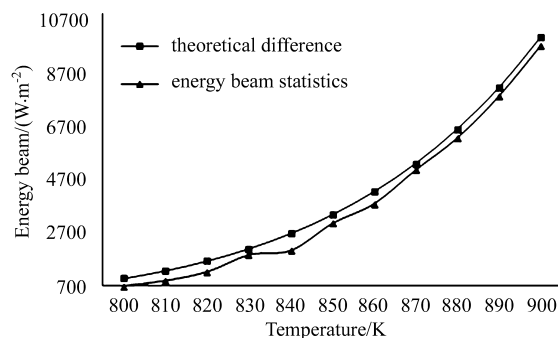


图 5 能束统计图

Fig.5 Energy beam statistics

参考文献 :

- [1] Wu Haibin, Wang Peng, Zhou Houwei, *et al.* Effect of color contrast of high temperature background radiation in furnace [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, **29**(2): 224-229(in Chinese).
吴海滨, 王 鹏, 周后伟, 等. 炉内高温背景辐射对比色测温的影响 [J]. *量子电子学报*, 2012, **29**(2): 224-229.
- [2] Cheng Ke, Li Xinzhong, Liu Ying, *et al.* The probability distribution of radiation refrigeration is studied by Monte Carlo method [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2002, **8**(2): 101-105(in Chinese).
成 珂, 李新中, 刘 迎, 等. 蒙特卡洛法应用于辐射制冷的概率分布研究 [J]. *真空与低温*, 2002, **8**(2): 101-105.
- [3] Howell J R. The Monte Carlo method in radiative heat transfer [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1998, **120**(3): 547-560.
- [4] Yang Wenjie. *Radiative Heat Transfer by the Monte Carlo Method* [M]. San Diego: Academic Press Inc, 1995: 52-60(in Chinese).
杨文杰. 蒙特卡洛法辐射传热 [M]. 圣地亚哥: 美国学术出版社, 1995: 52-60.
- [5] Fan Hongjie, Liu Lianwei, Xu Zhenling *et al.* The engineering arithmetic of the reflected infrared radiation characteristic for air-target [J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(5): 289-294(in Chinese).
樊宏杰, 刘连伟, 许振领, 等. 空中目标反射辐射特性工程算法 [J]. *红外技术*, 2013, **35**(5): 289-294.
- [6] Xu Youfu, Zhao Fengsheng, Gao Wenhua, Research of atmospheric background radiation simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(s2): 389-393(in Chinese).
许尤福, 赵凤生, 高文华. 大气环境背景辐射仿真研究 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(s2): 389-393.
- [7] Tian Qijie, Li Zhou, Chang Songtao, *et al.* Measurement method of infrared radiometric characteristics for high-temperature small targets [J]. *Journal of Optics*, 2017, **37**(10): 1012004(in Chinese).
田棋杰, 李 周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法 [J]. *光学学报*, 2017, **37**(10): 1012004.