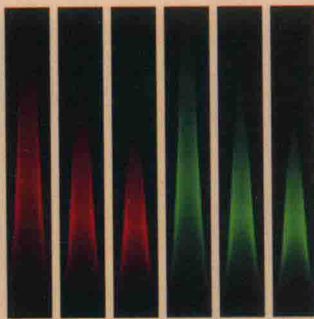
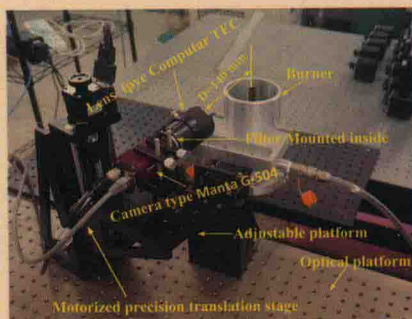


基于光谱分析和图像处理的 火焰温度及辐射特性检测

*Measurement of Flame Temperature and Radiative Properties Based on
Spectral Analysis and Image Processing*

闫伟杰 著



中国矿业大学出版社

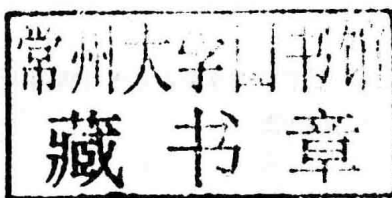
China University of Mining and Technology Press

0443.2
2013.2

3 8

基于光谱分析和图像处理的 火焰温度及辐射特性检测

闫伟杰 著



中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于光谱分析和图像处理的火焰温度及辐射特性检测/
闫伟杰著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2017. 11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3758 - 3

I. ①基… II. ①闫… III. ①火焰温度—检测②火焰—辐射—特性—检测 IV. ①O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 268850 号

书 名 基于光谱分析和图像处理的火焰温度及辐射特性检测
著 者 闫伟杰
责任编辑 仓小金
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 10.25 字数 195 千字
版次印次 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着全球能源危机的日益严重和人们对环境问题的逐渐关注,提高燃烧设备的燃烧效率、减少污染物排放成为广大学者研究的热点。温度是反映燃烧状态的一个重要参数,其准确测量对于了解燃烧过程和完善燃烧理论具有重要指导意义。温度和辐射特性参数是耦合在一起的,因此实现温度和辐射特性参数的同时准确测量是一种有效的方法。火焰的辐射光谱和图像中包含着与温度和辐射特性有关的大量信息,利用这些信息结合特定的算法可以计算得到火焰表观温度、黑度、内部温度、辐射介质颗粒浓度等多个参数。本书将研究如何利用火焰辐射光谱和图像测量这些参数,本书的主要研究内容如下:

(1) 基于火焰可见光波段内的辐射光谱和图像开展火焰表观温度和黑度测量研究,研究对象为城市固体废弃物垃圾燃烧火焰。与常见的煤粉燃烧火焰不同,此类火焰的辐射光谱在可见光波段内存在两条强烈的特征谱线,分别为 590 nm 处 Na 特征谱线和 767 nm 处 K 特征谱线。研究过程中首先进行了光谱分析:利用双色法以 3 nm 为波长间隔计算 500~900 nm 波段内的温度分布和黑度分布,根据黑度随波长变化规律判定火焰的灰性波段区间。在 500~900 nm 波长范围内,除 Na、K 特征谱线之外的连续辐射光谱满足灰性。由于 Na、K 特征谱线远离本书所用图像探测系统的 R、G 中心波长,敏感性分析表明此两条特征谱线的存在未对图像法测温造成较大干扰,因此图像法适用于此类火焰的温度和黑度测量。现场检测试验分别利用光谱法和图像法测量得到了炉膛三层不同高度、八个测点处的火焰温度分布

和黑度分布。

(2) 以吸收、发射、无散射、轴对称含烟黑的乙烯层流扩散火焰为研究对象,利用非单色可见光火焰图像开展火焰温度和烟黑颗粒体积浓度同时重建的数值模拟研究。研究过程中首先讨论了不同重建算法对温度和烟黑颗粒体积浓度重建精度的影响:在正确选择正则化参数前提下,Tikhonov 正则化算法的抗噪性相对较强;其次分析了自吸收项对重建结果的影响:忽略自吸收项会在火焰轴心处高估烟黑颗粒体积浓度而低估火焰温度;最后分析了重建算法对不同光学厚度的适应性:利用书中提出的同时重建算法在 6 倍大光学厚度下仍可以得到良好的结果,这说明算法具有很广的对象适应性。

(3) 利用火焰可见光辐射光谱和图像开展轴对称乙烯/空气层流扩散火焰的温度和烟黑颗粒体积浓度同时测量的实验研究。光谱测量时首先利用光谱仪采集火焰在可见光波段的辐射光谱,根据基于双色法的灰性判断原理判定火焰的灰性波段区间,在此基础上计算得到了 350~800 nm 波段内火焰的黑度分布,其次根据吸收系数与黑度的之间的函数关系得到了烟黑颗粒的吸收系数分布特性。图像测量时首先利用单台相机结合图像处理技术测量得到高分辨率火焰图像(1 mm/65 pixels),其次在求解辐射传递方程过程中利用吸收系数分布特性对烟黑颗粒的非灰辐射特性进行修正。实验测量得到了三个不同乙烯流量下的火焰温度和烟黑颗粒体积浓度二维轴对称分布。

(4) 开展 O_2/N_2 和 O_2/CO_2 气氛下乙烯富氧燃烧火焰的燃烧特性实验研究。首先利用火焰辐射光谱和图像测量得到了两种气氛下 30%、40%、50% 三种氧浓度的火焰温度分布和烟黑颗粒体积浓度分布。 O_2/N_2 气氛下最高火焰温度随氧浓度升高而升高,最高烟黑颗粒体积浓度在 50% 氧浓度时略微下降; O_2/N_2 气氛下最高烟黑颗粒体积浓度均高于空气气氛下; O_2/CO_2 气氛下最高火焰温度和最高烟黑颗粒体积浓度均随氧浓度的升高而升高;与 O_2/CO_2 气氛下燃烧相比,相同氧浓度下 O_2/N_2 气氛下火焰的温度和烟黑颗粒体积浓度、火焰长

度、可见光辐射强度均相对较高;利用 Roper 解可以准确地预测 O_2/N_2 气氛下的火焰长度,而 O_2/CO_2 气氛下的预测结果相对较差;修改 Roper 经验公式中的参数后, O_2/CO_2 气氛下的预测结果得到了很大改善。

著 者
2017.1

目 录

1 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 发射法测温技术介绍	5
1.3 火焰富氧燃烧研究	14
1.4 本书主要研究内容	19
2 基于灰性判断的火焰表观温度和黑度同时测量研究	22
2.1 背景介绍	22
2.2 测量方法原理介绍	24
2.3 光谱系统及图像系统标定	27
2.4 检测试验及讨论	35
2.5 本章小结	49
3 火焰温度和烟黑颗粒体积浓度同时测量的模拟研究	51
3.1 背景介绍	51
3.2 适用于图像法的辐射传递方程	53
3.3 辐射传递逆问题基本理论	59
3.4 数值模拟结果及讨论	62
3.5 本章小结	77
4 乙烯/空气火焰温度和烟黑颗粒体积浓度同时测量实验研究	79
4.1 背景介绍	79
4.2 层流扩散火焰燃烧检测实验台	81
4.3 光谱和图像系统标定	86
4.4 火焰光谱分析	92

4.5	火焰图像处理	97
4.6	测量结果及分析	102
4.7	本章小结	107
5	O_2/N_2 和 O_2/CO_2 气氛下乙烯富氧燃烧火焰的燃烧特性研究	108
5.1	研究背景	108
5.2	火焰光谱和图像检测	109
5.3	火焰温度和烟黑颗粒体积浓度测量	114
5.4	本章小结	126
6	全书总结与展望	128
6.1	全书总结	128
6.2	未来工作展望	131
	参考文献	133

1 绪 论

1.1 课题背景

能源是一种重要的资源,关系到国家的命脉。随着科技的发展,太阳能、风能、生物质能、地热能、核能等新能源的利用越来越广泛,在世界能源结构中占的比重越来越大,这是解决能源危机的必由之路,也是未来能源发展的主要方向。英国石油公司 2013 年能源报告显示^[1],受全球经济危机影响,2012 年全球能源消耗增速减缓,但能源供给的多样性增强。在大量消耗能源的同时,我国的生态环境问题日益严重,我国大气污染中最严重的污染物是 PM_{10} ,不到三分之二的城市 PM_{10} 浓度符合 II 级标准,这比 SO_2 和 NO_2 超标造成的大气污染更为严重。目前大气污染物中的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也呈增高趋势,空气污染已经成为困扰我国城市发展的重要环境问题。在全球生态环境日益严重的今天,低碳环保受到格外关注,如何清洁高效利用能源成为一个迫切需要解决的问题。

目前世界上对能源的获取方式主要以燃烧化石燃料为主,并且在未来很长一段时间内化石燃料将一直是现代社会重要的能量来源。化石燃料燃烧过程中排放的污染物主要有:碳氧化物、氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物、多环芳烃(PAH)、硫氧化物(SO_x)、烟黑(soot)和粉尘等,这些污染物的产生和排放不但降低了燃烧效率,同时也破坏生态环境、危害人类自身健康。

燃烧污染物的产生与燃烧过程有关,火焰温度和辐射介质的辐射特性是反映燃烧进程的两个重要参数,准确测量这两个参数对深入研究燃烧机理具有指导作用,同时也对了解燃烧过程中的产热和放热(辐射、对流、导热等)具有重要意义。在工业生产中,工业燃油锅炉、电站煤粉锅炉、燃气炉等大型动力设备的稳定、经济、安全运行都离不开对温度的准确监控;内燃机、热气机等中小型动力设备的设计开发也需要测量和控制燃烧室内的火焰温度;另外在国防领域,准确测量火焰温度对于完善航空发动机设计、改善武器弹药配方、提高杀伤力等方面也具有重要的指导作用。目前关于火焰温度测量方法的研究众多,如图 1-1 所示。戴景民等^[2]学者在综述文献中归纳总结了几种常见的火焰温度测量技术。火焰温度测量技术大致可以分为接触式和非接触式两大类。热电偶测温法^[3,4]和光纤测温法^[5]是两种常见的接触式测温方法,利用接触式温度测量技术进行测量时,测温元件需要与被测对象接触,容易干扰被测对象,因而得到的测量结果精度往往不高;另一方面接触式测温还具有动态响应差、空间和时间分辨率低等缺点;除此之,受设备限制,接触式测温往往不适用于一些恶劣工作环境下的温度测量。在非接触式测温法中,声波法^[6,7]等测温方法经常被报道。文献中报道较多的是基于光学信息的火焰温度测温方法。

基于光学的温度测量技术通常可以分为两类:① 外界强加测量信号(如激光、卤素灯等)。② 以被测对象自身辐射信息作为测量信号。激光光谱法属于第 1 类,其中包括基于干涉原理的激光全息干涉法^[8,9]、激光散斑成像法^[10]、纹影法^[11]、激光径向剪切干涉法^[12,13]以及基于对激光光谱信号强度的处理结合 Boltzmann 公式的包括拉曼散射光谱法^[14,15]、Rayleigh scattering 光谱法^[16]、CARS 光谱法^[17-20]、LIF^[21,22]、TDLAS^[23,24]等。这些测量技术不仅可以得到火焰温度,同时还能测量燃烧过程的中间组分,测量结果的时间分辨率和空间分辨率均较高,此类测量技术是目前研究的一个热点^[25]。但是激光测

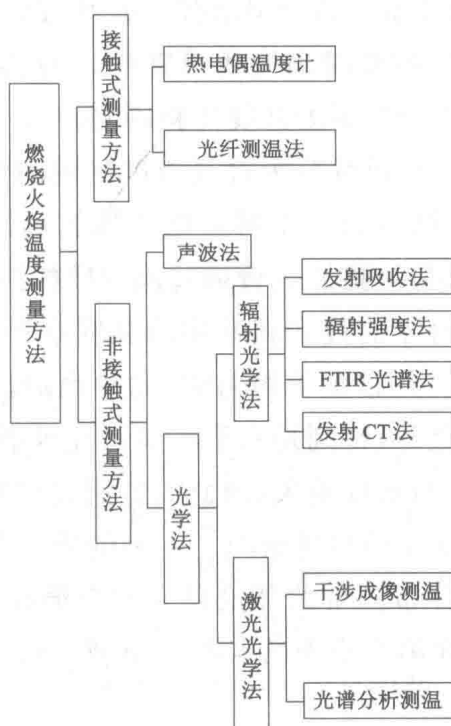


图 1-1 常见的温度测量方法

温技术也存在一些缺陷:设备要求高,价格昂贵,操作复杂。目前还极少用于工业现场的温度测量,主要用于专业人员针对实验性质的火焰开展燃烧诊断。另外,基于辐射光谱和可见光图像的检测方法应用也越来越广泛,其中基于光谱数据处理的检测方法能够得到多波长下的火焰辐射光谱信息,有利于减少辐射介质非灰性等因素对测量结果的影响,近年来这种测量方法在实验室小型火焰和大型工业炉膛火焰上均有大量应用报道^[26-36],多光谱测温法通常只能进行单点测量。随着图像传感器技术的发展,相机配置参数逐渐提高,许多研究者开始利用火焰辐射图像开展温度和辐射特性测量研究^[37-63],同光谱法相比,利于图像法更便于得到二维或三维场检测结果。本章第 1.2 节将分别对基于火焰辐射光谱和可见光图像的测温

方法进行综述,在第2章中将介绍结合火焰可见光辐射光谱和图像进行火焰表观温度和黑度同时测量的研究内容,并利于此方法在一台城市固体废弃物垃圾焚烧炉上开展实验研究。

火焰的温度测量可以细分为表观温度测量和辐射介质内部温度测量,其中表观温度测量是基于对火焰边界能量处理得到的视线方向上的温度,一般认为该温度是火焰整体温度的平均值,理论上只有火焰内部温度均匀时才能代表其真实的温度水平,而实际过程中绝大多数火焰内部温度分布是不均匀的,此时火焰表面温度值与真实温度分布值会存在差异,特别是对于实验研究级别的小型火焰,其几何尺寸更小,温度分布梯度更大,因此实验研究层面有必要开展火焰内部辐射介质温度分布的测量研究。本书的第3章将介绍火焰内部辐射介质真实温度分布测量的理论研究和数值模拟研究,并将此检测技术应用第4章和第5章中的实验室小型乙烯层流扩散火焰的燃烧诊断。

在利用燃烧检测手段完善现有燃烧技术之外,发展新型燃烧技术也是一种节能减排的有效手段。传统的燃烧技术会排大量污染物如 CO_2 、 NO_x 、烟黑颗粒、粉尘等,随着科技的进步,一些新兴的燃烧技术不断出现,其中富氧燃烧技术被认为是一种具有发展潜力的新技术。富氧燃烧技术(OEC)是通过提高氧化剂中的氧浓度来强化燃烧,达到节能的目的,极限状态是纯氧燃烧,大量应用于钢铁工业、玻璃制造、有色金属冶炼等多个行业,在汽轮机、内燃机等常用动力装置中也有应用。近年来为应对全球气候变暖, CO_2 减排受到越来越多的重视,由于煤电行业 CO_2 减排量巨大因此受到较多关注。目前电站煤粉锅炉排放的 CO_2 浓度一般较低,从排烟中分离出 CO_2 难度很大,这需要增加复杂的烟气分离设备,造价高昂。 O_2/CO_2 富氧燃烧技术在这样一背景下被提出来,这种技术以 O_2/CO_2 代替 O_2/N_2 作为氧化剂气流并结合烟气再循环理论可以实现 NO_x 和 CO_2 零排放^[64,65]。应用 O_2/CO_2 富氧燃烧技术后,燃烧尾气产物中 CO_2 的浓度可达

95%，因此可不必分离烟气而直接液化回收处理 CO_2 ，达到了降低回收成本的目的。本书第 5 章将开展实验室小型乙烯层流扩散火焰在氮气和二氧化碳气氛下富氧燃烧的燃烧诊断研究，研究两种气氛下火焰的燃烧特性，为富氧燃烧技术的工业应用提供借鉴作用。

1.2 发射法测温技术介绍

1.2.1 火焰辐射特性

火焰热辐射主要是由燃烧过程中的固体颗粒物产生的。火焰中颗粒物的含量影响火焰辐射强度的大小，目前对辐射特性的研究主要以实验手段为主。由于不同燃料燃烧火焰中固体颗粒物不同，因此研究中得到的辐射特性参数不具有普遍性。即使对于同种燃料火焰，不同燃烧部位处的辐射特性参数也不尽相同。

碳氢燃料燃烧过程中火焰的主要成分由气体和固体组成，气体成分通常包括一氧化碳、氮气、氧气、水蒸气、二氧化硫、二氧化碳等，固体成分主要是由烟黑、焦炭粒子、飞灰等粒子组成。其中氮气和氧气不参与辐射换热，其辐射强度可以忽略不计。对于每一份物质，它们的发射光谱都对应一系列的特定谱线或者谱带。其中气相成分的辐射光谱很复杂，为非连续的光谱分布^[66]，固体颗粒则能发射和吸收全波长的辐射能。

燃料根据其物理状态主要可以分为三种：固态类燃料、气态类燃料和液态类燃料。煤炭占固态类燃料的绝大部分；气态类燃料包括城市煤气、天然气、液化石油天然气等；液态类燃料主要为石油等。固体燃料的燃烧过程可以分为干燥、着火、燃烧等阶段。挥发分的燃烧过程是扩散燃烧，焦炭颗粒的燃烧是表面燃烧。煤粉燃烧时辐射出可见光，火焰辐射能量中同时包含颗粒物的辐射和气体辐射。燃烧火焰中包含炭粒、灰粒、烟黑等多种固体颗粒，由于固体颗粒物的

发射率远大于气体,因此煤粉燃烧火焰的辐射能力主要由火焰面内的炭粒和炉膛空间内的灰粒决定。蔡小舒等学者^[28]的研究表明,煤粉燃烧火焰在可见光波段内的辐射特征近似于灰性。

液体燃料以油类为例,相比于固体燃料煤炭,油类燃料的沸点更低(沸点通常低于着火温度),因此油类是以气体的状态燃烧。在温度升高后油类开始蒸发形成油蒸气,油蒸气与氧化剂相互扩散,混合气体达到燃点后便开始燃烧。要促进油类燃料的燃烧进程,首先要保证油良好的雾化和与氧化剂的良好混合。油类燃料在燃烧不充分时容易产生大量的烟黑和焦炭,这会造成机械不完全损失^[67]。烟黑颗粒一般形成于燃烧器根部,并且在该处会产生可见光辐射。周剑光等学者^[68]研制了一套光谱采集系统,利用此系统研究汽油发动机缸内火焰燃烧在近紫外到可见光辐射光谱,汽油火焰的辐射光谱主要由固体碳颗粒辐射产生。因此液体燃料燃烧时,火焰的辐射主要由火焰内部的烟黑颗粒辐射决定。

扩散燃烧、无焰燃烧和大气燃烧是三种常见的气体燃烧方式。扩散燃烧的燃烧进程受到燃料与氧化剂混合过程的影响;无焰燃烧在燃烧前需要燃气与空气完全混合;Goldstein R. J. 等^[69]研究表明大气燃烧介于扩散燃烧和无焰燃烧之间,在火焰锥面为动力燃烧,在外锥面为扩散燃烧。气体燃料燃烧充分时烟气中固体颗粒物的含量很低,烟气主要成分包括二氧化碳、水蒸气和氮气等。由于二氧化碳和水蒸气的主要辐射光谱位于可见光波段之外,因此燃烧火焰亮度、黑度很小,颜色近于无色或略带蓝色。王琼等学者^[70]研究了扩散火焰和预混火焰的辐射特性,研究对象为液化石油天然气。研究结果表明:扩散火焰的颜色为褐红色,火焰的辐射光谱是由火焰中烟黑颗粒在高温下辐射发出的;预混火焰的火焰颜色为蓝色,辐射光谱表现为非连续光谱。这是因为液化石油天然气在预混燃烧方式下燃烧充分,燃烧产物中烟黑颗粒体积浓度很低,此时其辐射特性属于无焰气体辐射的研究范畴,由此可见,气体燃烧火焰的辐射特性更加复杂。

通常可以采用两种不同的方式描述火焰辐射特性^[71]: (a) 火焰黑度; (b) 基于电磁理论的吸收系数、散射系数、散射相函数。火焰黑度是反映火焰辐射能力的重要参数, Àgueda A. 等^[72]学者对森林可燃物的火焰黑度进行了测量研究, 研究过程中利用红外辐射图像信息计算得到了黑度与消光系数之间的关系; Sudheer, S. 等^[73]研究了汽油火焰的黑度, 作者从燃烧理论和实验测量两个方面进行研究, 分别利用质量燃烧速率和燃烧测量技术得到了火焰的理论黑度和测量黑度, 并对两种结果进行了对比; 蔡小舒等^[74]利用燃烧测量技术得到了电站煤粉锅炉的火焰黑度, 并且在锅炉设计中考虑了测量黑度, 重新计算了排烟温度。本书将利用火焰辐射光谱和图像研究城市固体废物垃圾燃烧火焰、实验室小型乙烯扩散燃烧火焰的黑度、温度、烟黑颗粒体积浓度等参数的分布特性。

吸收系数和散射系数考虑了火焰辐射的吸收和散射作用, 结合辐射传递问题的求解算法, 可以对辐射参数和温度进行同时测量。实验室小型碳氢火焰的辐射特性主要取决于火焰内部颗粒物的辐射特性。Taylor P. B. 等^[75]测量得到了颗粒物的复折射率, 在此基础上根据 Mie 理论获取了颗粒物的辐射特性。但是火焰中颗粒浓度受燃料类型、燃烧方式、过量空气系数等多种因素影响, 情况非常复杂, 因此采用这种方法估算颗粒物的辐射特性存在很大不确定性。目前广泛的方法是采用测试的手段研究颗粒物的辐射特性, 通过采集火焰辐射信息并结合辐射传递方程求解算法来计算颗粒物的辐射特性。何旭等^[76]利用 LII 测试技术测量得到了柴油发动机气缸内的火焰炭黑颗粒浓度分布; 浙江大学王飞等^[77]基于火焰可见光辐射图像测量得到了煤粉锅炉炉膛内颗粒浓度分布, 在此基础上研究了煤粉火焰的消光系数与颗粒浓度之间的关系; 华中科技大学周怀春教授课题组^[78]等利用火焰辐射图像通过求解辐射传递方程, 计算得到了煤粉锅炉炉膛内三个不同高度截面的吸收系数和散射系数, 研究结果表明火焰辐射特性与固体颗粒中的含碳量有关。Snelling 等^[29]利用光

谱仪采集 C_2H_4/Air 层流扩散火焰在可见光波段内的辐射光谱,通过求解辐射传递方程同时测量得到了火焰多个高度上的温度分布和烟黑颗粒体积浓度分布;浙江大学黄群星等^[79]学者以乙烯/空气层流扩散火焰为研究对象,利用单台 CCD 相机采用分光装置采集得到两幅单色图像,通过求解辐射传递方程测量得到了火焰断面温度分布和烟黑颗粒体积浓度分布。

1.2.2 基于辐射光谱的发射法

(1) 双色法

双色法测温很早就被用于火焰温度测量,基本原理是测量两个不同波长下的辐射强度,利用比值算法来消除未知系数对温度测量(如火焰单色黑度)的影响,从而使温度计算过程得到简化。基于 Planck 定律或 Wien 辐射定律的双色法主要分为两类:

第一种类型是基于表观温度的双色法,根据 Planck 定律和 Hot-tel and Broughton 经验公式,火焰温度可以通过两个波长下的测量的单色辐射强度由式(1-1)通过迭代计算得到:

$$\left[1 - \left(\frac{e^{C_2/\lambda_1 T} - 1}{e^{C_2/\lambda_1 T_{a1}} - 1}\right)\right]^{\lambda_1^{\beta_1}} = \left[1 - \left(\frac{e^{C_2/\lambda_2 T} - 1}{e^{C_2/\lambda_2 T_{a2}} - 1}\right)\right]^{\lambda_2^{\beta_2}} \quad (1-1)$$

式中, T_{a1} 和 T_{a2} 为表观温度与火焰温度 T 在波长 λ_1 和 λ_2 下具有相同辐射强度的黑体温度; C_2 为 Planck 第二常数;参数 β 与烟黑颗粒的光学属性和物理特性有关。

第二类双色法通过忽略火焰黑度随波长变化,假设火焰满足灰性来实现的,根据 Wien 辐射定律,利用两个波长下的单色辐射强度可以计算得到被测对象的温度,如式(1-2)所示:

$$T = \frac{-C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)}{\ln \frac{L(\lambda_1, T)}{L(\lambda_2, T)} - \ln \left(\frac{\epsilon(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)}\right) - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (1-2)$$

式中, $\epsilon(\lambda_1, T)$ 和 $\epsilon(\lambda_2, T)$ 分别为 T 温度时被测对象在波长 λ_1 和 λ_2 下

的黑度。

通过式(1-2)可知, $\epsilon(\lambda_1, T)$ 和 $\epsilon(\lambda_2, T)$ 为未知量, 要想得到准确的测量温度, 必须选取合适的测量波长, 使满足 $\epsilon(\lambda_1, T) \approx \epsilon(\lambda_2, T)$, 则 T 可通过式(1-3)计算得到:

$$T = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) / \ln \left[\frac{L(\lambda_1, T) \lambda_1^5}{L(\lambda_2, T) \lambda_2^5} \right] \quad (1-3)$$

第一类双色法广泛应用于内燃机行业的燃烧火焰温度测量, 而第二类双色法由于在计算过程中不需要迭代, 使用更加方便, 应用此类双色法的前提是要求被测对象在所测波长下要满足灰性, 此类双色法常用于工业火焰温度测量。Yan 等^[80] 利用双色法研究了柴油发动机火焰的温度和 KL 因子, 研究过程中以两个不同波长下的单色辐射强度为测量信号; 潘克煜等^[81] 发展了第一类双色法, 研究过程中考虑了微粒衍射理论, 在此基础上讨论了负荷、转速等参数对柴油机缸内火焰温度及炭黑颗粒体积浓度的影响。

(2) 选择性多波长测温法

1964 年, Reynolds 等学者^[82] 提出基于选择性多波长的火焰温度测试技术。20 世纪 70 年代, 多波长温度测试技术得到了飞速发展, 科研人员利用此测温原理研制出一系列的多波长高温计。1986 年, Hiernaut 等学者研制成功了六波长高温计, 温度测量的最小误差 < 0.5%, 黑度测量的误差范围为 1%~5%。戴景民^[83] 采用棱镜分光原理研制出了 35 波长高温计, 并且作者利用此多波长高温计研究了烧蚀燃料的温度。同期温度测量理论研究也得到了深入发展: 哈工大戴景民^[83] 提出了一种新的多波长温度测量数学模型, 此模型基于亮度温度, 后期研究中作者又提出了基于参考温度的数学模型^[84], 同时对这种数学模型的测量误差进行了理论分析; 孙晓刚等^[85,86] 将人工神经网络和其他优化算法应用于温度测量的数学模型中, 用于研究被测对象黑度与波长之间的函数关系。程晓舫等^[87] 学者建立了窄谱带内发射率线性变化的模型, 利用此模型开发出三波长温度测量