

基于U型压力计设计热辐射计及热辐射规律探究

孙振翠 王建 周少帅 杨文栋

(山东交通学院理学院, 山东 济南 250357)

摘要: 为了研究热辐射现象和规律, 本文设计了自制的基于U型压力计的热辐射计作为热辐射测量装置并搭建了可探究热辐射规律的实验平台, 定量研究斯特藩-玻尔兹曼定律和辐射出射度与距离的平方反比关系(即辐射反平方定律)。为了验证自制热辐射测量装置的实用型, 自制热辐射计采集的压强差与商用MR-5型辐射热计测试的辐射值建立联系, 推导出了压强差和辐射值的转换公式, 从而可以根据测得的压强差, 计算出热辐射值。同时, 将不同距离和不同温度下测试的压强差带入拟合公式, 拟合值和商用测试值进行比较, 误差较小, 拟合效果良好。因此, 基于U型压力计设计的热辐射计可以有效替代辐射热计, 从而实现实际应用, 自制热辐射计成本低、操作简便, 可引入到大学物理实验教学中。

关键词: 热辐射; 基于U型压力计的热辐射计; 斯特藩-玻尔兹曼定律; 辐射反平方定律

一、引言

热辐射是物体由于热的原因向外发出的辐射。在日常生活中, 很容易观察到一些热辐射的现象, 比如说, 太阳散发出的辐射热量到达地球, 使得地球的大气温度升高; 火源、光源散发出热辐射, 使周围空气温度升高; 电器设备的辐射, 如电炉、电熨斗、电吹风等, 通过辐射方式传递热量, 使用这些设备时, 可以感受到它们发出的热辐射。

辐射换热不需要中间介质, 它可以在真空中发生; 在辐射换热过程存在能量形式的转换, 从物体表面发出辐射时, 由物体的内热能转化为电磁能发出辐射。在电磁波的波谱中, 热辐射在1-100微米之间的射线, 称为热辐射。它包含了部分的紫外线区域, 全部的可见光和部分的红外线。

为了研究辐射特性, 引入黑体模型, 黑体是吸收比为1的物体, 是一种理想物体, 它的辐射能力只与温度有关。黑体具有最大的辐射能力, 黑体的辐射力满足斯特藩-玻尔兹曼定律, 其内容为: 黑体表面单位面积在单位时间内辐射出的总能量E与黑体本身的热力学温度T的四次方成正比。其表达式为: $E = \sigma T^4$, 该定律描述了黑体辐射力随表面温度的变化规律。辐射力为单位时间内, 物体单位表面积向半球空间所有方向发射的所有波长的能量总和。辐射具有方向性和选择性, 满足兰贝特定律和普朗克定律。普朗克定律描述了黑体光谱辐射力随波长及温度的变化规律, 体现了辐射的选择性。波长与温度乘积为常数, 满足维恩位移定律。

基于热辐射的基本理论, 人们发明了诸多实用仪器, 如红外测温仪、热成像仪等仪器, 在军事侦察、工业检测、红外治疗、航空航天等领域占有极其重要的地位。因此研究热辐射的相关规律具有很大的现实意义。为此, 国内外设计了一些实验方法和高精度实验设备, 用于验证热辐射规律, 如维恩位移定律、斯特藩-玻尔兹曼辐射定律、热辐射传播的反平方定律。

由于实际并不存在黑体, 而且黑体又具有最大的吸收能力和最大的发射能力, 对于辐射换热方向的研究非常重要, 为了研究黑体的辐射特性, 可以构造出人工黑体模型, 常见构造的近似黑体有灼热的空腔、可控温发热板、辐射方盒(铝板、白炽灯)、组装黑体辐射器、面辐射源(金属铝辐射体、陶瓷加热片)。

为了探究热辐射规律, 需要选择合适的辐射热计, 辐射热计是研究辐射交换的重要工具, 在太阳能利用、空间技术、气象研究、工业、冶金、能源动力、医疗卫生等领域中有着重要的应用。探究实验常见的热辐射计有非制冷微测热辐射计、红外传感器、热电堆型热辐射传感器。

由于探测热辐射仪器较为昂贵, 其应用仍然有一定的局限性。本文制作了基于U型压力计的热辐射计作为热辐射测量装置, 自

制的热辐射计价格便宜, 操作方便, 易于操作, 测量准确度高, 可以应用于各个领域。

本文从辐射源、热辐射测量装置和探究热辐射的规律三个方面开展探究, 具体如下: 1. 采用灼热的高温炉腔作为辐射源; 2. 用MR-5型辐射热计、自制基于U型压力计的热辐射计作为热辐射测量装置; 3. 用自制热辐射计, 探究热辐射与温度、距离的关系, 验证斯特藩-玻尔兹曼辐射定律和辐射距离平方反比规律。4. 自制热辐射计采集数据与辐射热计测得辐射值建立联系, 证明自制热辐射计的实用性。本文不仅对物理实验教学和学术研究有重要意义, 而且在工业生产、环境控制等领域也有广泛的应用前景。

二、实验装置的设计和实现

(一) 搭建可探究热辐射规律的实验平台

1. 用高温炉作为辐射源, 高温炉(图2-1)的温度可以通过温控仪(图2-2)精确控制、炉口距离高温炉中心大约17cm。

2. 用MR-5型辐射热计作为单向辐射热计, 打开辐射测头保护盖, 并将测头对准炉口方向, 即可直接测量不同位置处的热辐射强度。

3. 如图2-3所示, 由于炉口较高, 辐射热计无法直接放置在炉口处测量, 本实验借助升降平台及导轨放置辐射热计。

4. 如图2-3所示, 为了探究斯特藩-玻尔兹曼定律和辐射反平方定律, 本实验测量在距离辐射源同一距离不同温度下的辐射强度、同一温度不同距离处的辐射强度, 利用导轨刻度值, 辐射热计距离辐射源的位置即可直接观测。



图2-1 高温炉



图2-2 温控仪

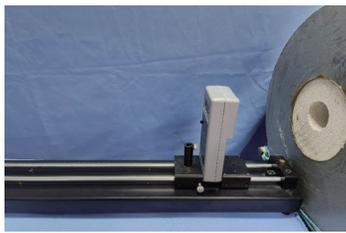


图 2-3 基于单向辐射热计的测量装置图

(二) 基于 U 型压力计的热辐射计装置设计与实现

为了验证基于 U 型压力计的热辐射计的可行性, 辐射源和测试平台搭建同基于辐射热计的测量条件一致。因此, 这部分实验的关键是设计基于 U 型压力计的热辐射计, 下面是基于 U 型压力计的热辐射计装置的设计和实现。

借鉴辐射热计的工作原理, 本实验设计了一个基于 U 型压力计的热辐射计作为热辐射测量装置。

如图 2-4 基于 U 型压力计的“黑白”式热辐射测量装置, 在此实验装置中, 本文借鉴辐射热计原理, 采用两个黑白瓶, 利用黑色平面几乎能全部吸收辐射热, 而白色平面几乎不吸收辐射热的性质, 在高温炉产生的热辐射的照射下, 黑瓶温度升高, 与白瓶造成温差, 从而使 U 型压力计产生压强差。

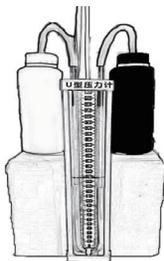


图 2-4 基于 U 型压力计的“黑白”式热辐射计



图 2-5 基于 U 型压力计的“黑黑”式热辐射计



图 2-6 基于 U 型压力计的热辐射计

为了更好的排除外界热辐射, 例如太阳光热辐射、灯光热辐射等对测量产生的影响, 如图 2-5, 本实验将黑白瓶换为两个相同黑瓶, 设计了基于 U 型压力计的二代热辐射测量装置“基于 U 型压力计的“黑黑”式热辐射计”。

如图 2-6 为基于 U 型压力计的热辐射计装置实现图, 本实验对测试效果及测量精度综合考虑, 选择了量程为 0-5000Pa 的 U 型压力计。在 U 型压力计的玻璃管中注入纯净水, 将其放在支架上, 用夹子固定。分别在两个黑色塑料瓶瓶盖上打孔, 用橡胶软管穿过, 橡胶软管与瓶盖之间的缝隙用热熔胶密封。将瓶盖与瓶身拧紧, 用生胶带密封, 保证其密封性。将两个黑色塑料瓶分别放在 U 型压力计两边, 保证二者到压力计的距离相等。瓶盖上的橡胶软管的另一端分别与压力计的玻璃管相连。

如图 2-7 所示, 搭建好基于 U 型压力计的热辐射测量装置。

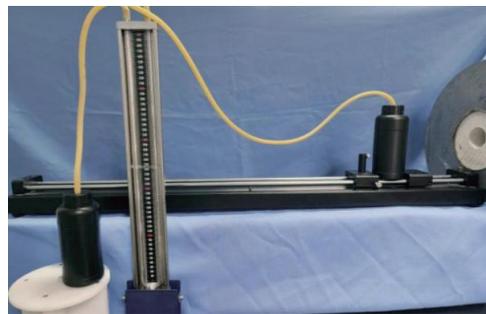


图 2-7 基于 U 型压力计的热辐射测量装置

测量热辐射强度过程中, 用挡板挡在对照黑瓶与高温炉之间, 隔绝辐射源对这个黑瓶的照射, 减小实验误差。高温炉产生的热辐射影响炉口处的黑瓶, 而不影响另一端的黑瓶。高温改变炉口处的黑瓶的温度, 使两个瓶子形成温差。温差使压力计两端的空气柱发生变化, 使之形成压强差。利用 U 型压力计的压强差可以直观反映出炉口处黑瓶吸收热辐射的多少。炉口处黑瓶吸收的热辐射越多, U 型压力计两端的液柱差值即压强差就越大。

三、热辐射规律的探究

(一) 基于单向辐射热计探究热辐射规律

基于辐射热计的测量装置如图 2-3 所示 (包括高温炉、升降平台、导轨、辐射热计、温控仪)。具体的操作步骤如下:

1. 炉口两端封闭, 通过温控仪使高温炉升温至 800℃, 并保持 60 分钟。
2. 打开一端炉口, 把辐射热计放置在炉口 10cm 处, 记录距炉口 10cm 处的热辐射强度, 测量三次求平均值。
3. 在 800℃ 下, 分别把辐射热计放置在炉口 10cm、15cm、20cm、25cm、……、100cm 处, 每隔 5cm 记录一个热辐射强度。
4. 温控仪控制高温炉降到 750℃, 保持 10min, 把辐射热计放在炉口 10cm 处, 记录辐射热计在 750℃, 炉口 10cm 处的热辐射强度。
5. 重复上述操作步骤, 记录高温炉 700℃、600℃、500℃、400℃、300℃ 时, 在炉口不同距离处 (炉口 10-100cm, 每隔 5cm 记录一个热辐射强度) 的热辐射强度。
6. 重复上述操作步骤, 记录高温炉 800℃、795℃、790℃、785℃、……、305℃、300℃ 下时, 距离炉口 10cm 处的热辐射强度。
7. 通过 origin 对数据进行处理分析。
8. 对计算结果进行分析, 探究热辐射规律。

记录同距离 (炉口 10cm)、不同温度下的辐射值部分数值。并通过 origin 对数据进行处理分析。如图 3-1 用 origin 对实验数据进行处理和拟合, 得到热辐射强度和温度的关系图。从表 3-1 和

图 3-1 可以看出，随着温度的升高，热辐射强度逐渐增加，为了探究辐射热计测量的热辐射强度与温度的关系，基于测量数据，利用 origin 拟合得到了热辐射强度与温度的四次方的关系图和关系式。

热辐射强度与温度四次方的关系为：

$$E = 4.9 \times 10^{-2} T^4 + 0.1497 \quad (1)$$

表明辐射热计测试的热辐射值与温度的四次方成正比。结果验证了斯特藩-玻尔兹曼定律。

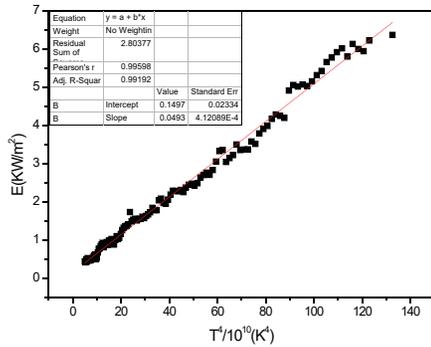


图 3-1 热辐射值与温度四次方的关系

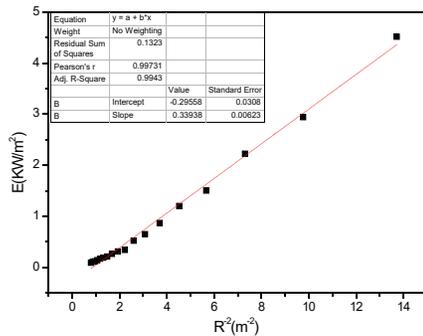


图 3-2 热辐射值与距离二次方倒数的关系

分析同温度（700℃）、不同距离（R）下的热辐射值 E，随着距离的增加，热辐射强度逐渐减小。为了探究热辐射强度与距离的关系，用 origin 对同温度不同距离下的实验数据进行拟合，如图 3-2 得到热辐射强度与距离的关系图和关系式。

热辐射强度与距离二次方倒数的关系为：

$$E = 3.333938 \frac{1}{R^2} - 0.29558 \quad (2)$$

结果符合辐射距离平方反比规律。

由此，实验所用的辐射热计能够正确反映热辐射规律，可以验证玻尔兹曼定律，即热辐射强度与温度的四次方成正比。同时得到热辐射强度与距离的关系，即热辐射强度与距离二次方的倒数成正比，符合辐射距离平方反比规律。测量的数据可信度高，可被用作自制热辐射计测量数据的标准。

（二）基于 U 型压力计的热辐射计探究热辐射规律

基于 U 型压力计的热辐射计测量装置如图 2-7 所示（包括高温炉、升降平台、导轨、U 型压力计的热辐射计、温控仪）。具体的操作步骤如下：

1. 搭建好基于 U 型压力计的热辐射测量装置。
2. 右侧黑瓶置于炉口 10cm 处，记录高温炉 800℃、750℃、700℃、650℃、600℃、550℃、500℃时，在炉口同一位置，U 型压力计的压力差。
3. 记录高温炉 800℃、700℃、600℃、500℃时，右侧黑瓶在

炉口不同距离处（炉口 10cm-80cm），每隔 5cm 测量一次，记录每一个状态下 U 型压力计的压力差。

4. 通过 origin 对数据进行处理分析。

5. 根据数据，分析基于 U 压力计的热辐射计测量的压强差与辐射热计测量的热辐射强度进行比较，建立压强差和热辐射强度的关系。

6. 用建立的关系式，拟合热辐射值，通过拟合公式计算的热辐射值和辐射热计测得的热辐射值进行比较，验证自制热辐射计的可行性。

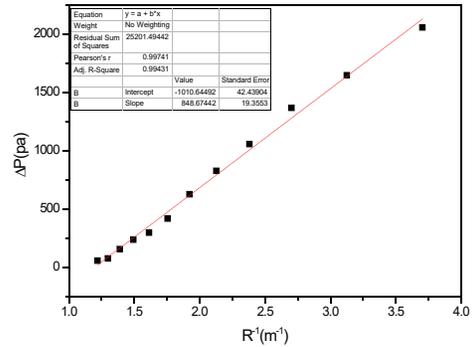


图 3-3 压强差与距离倒数的关系

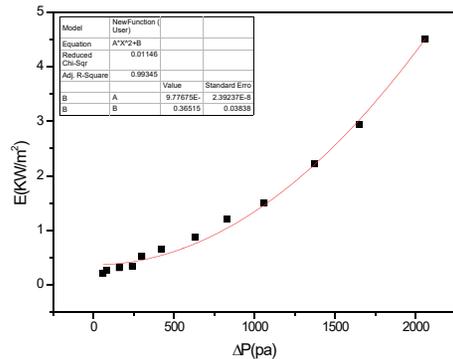


图 3-4 热辐射强度与压强差的关系

记录基于 U 型压力计的热辐射计测试的同温度（700℃）不同距离下的压强差，可以看出，随着距离的增加，压强差逐渐减小。如图 3-3 所示，为了探究压强差与距离的关系，基于测量数据，利用 origin 拟合得到了压强差与距离倒数的关系图和关系式。

压强差与距离倒数的关系式为：

$$\Delta P = 848.67442 \frac{1}{R} - 1010.64492 \quad (3)$$

可以看出，压强差与距离的倒数的成正比。

为了用基于 U 型压力计的热辐射计探究热辐射规律，验证自制热辐射计的可行性，将压强差与辐射热计测得的热辐射值建立联系，如图 3-4，利用 origin 拟合得到了热辐射强度与压强差的关系图和关系式，可以看出，热辐射强度正比于压强差的二次方。

由于热辐射强度正比于压强差的二次方，压强差与距离的倒数的成正比，可以进一步推导出热辐射强度与距离平方的倒数成正比。由此，基于 U 型压力计的热辐射计可以验证热辐射与距离的平方呈反比规律，即辐射反平方定律。

由此，得到热辐射强度与压强差的关系：

$$E = 9.77675 \times 10^{-7} \Delta P^2 + 0.36515 \quad (4)$$

为了让热辐射强度和压强差的拟合关系式更具有普适性，如图 3-5，进一步拟合得到含有压强差二次方和一次方的关系式，作为压强差和热辐射强度的转化公式。

$$E = 7.90565 \times 10^{-7} \Delta P^2 + 3.93969 \times 10^{-4} \Delta P + 0.25221 \quad (5)$$

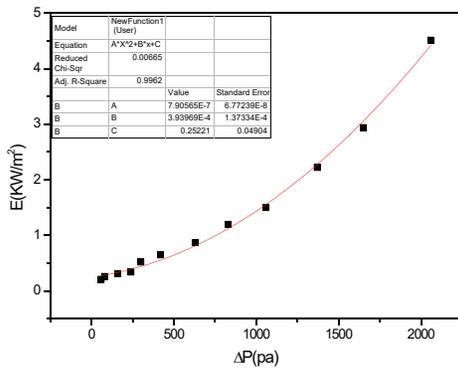


图 3-5 热辐射强度与压强差的关系

分析基于 U 型压力计的热辐射计测试的同温度 (800℃) 不同距离下的压强差和热辐射强度, 通过拟合公式 (5) 计算得到拟合热辐射值, 拟合热辐射值和测量得到的热辐射值, 相对误差为 3.25%。如题 3-6, 利用 origin 得到了热辐射值、拟合热辐射值随距离平方倒数的关系图和关系式, 可以看出拟合热辐射值和辐射热计测试的热辐射值基本吻合, 证明自制热辐射计的实用性, 同时可以根据得到的拟合关系系, 通过带入测量的压强差可以计算出热辐射强度。

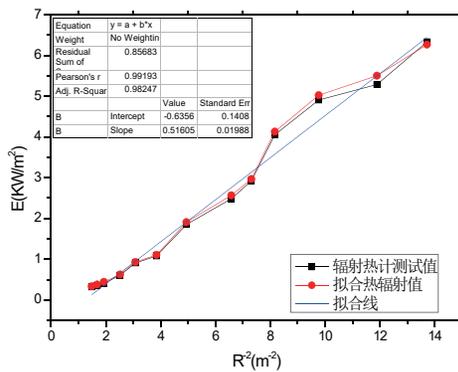


图 3-6 热辐射强度与距离平方倒数的关系

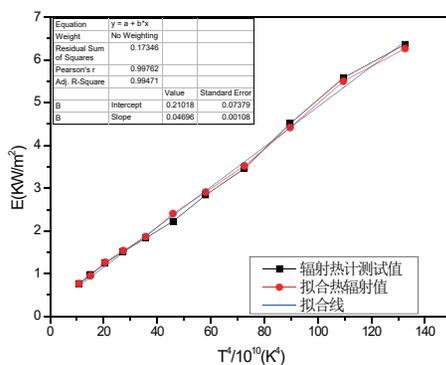


图 3-7 热辐射强度与温度四次方的关系

热辐射强度与距离二次方倒数的关系为:

$$E = 0.51605 \frac{1}{R^2} - 0.6356 \quad (6)$$

分析基于 U 型压力计的热辐射计测试的同距离 (炉口 10cm)、不同温度下的压强差和热辐射强度, 通过拟合公式 (5) 计算得到拟合热辐射值, 拟合热辐射值和测量得到的热辐射值, 相对误差为 2.42%。如图 3-7 利用 origin 得到了热辐射值、拟合热辐射值随温度四次方的关系图和关系式, 可以看出拟合热辐射值和辐射热计测试的热辐射值基本吻合, 证明自制热辐射计的实用性, 同时可以根据得到的拟合关系系, 通过带入测量的压强差可以计算出热辐射强度。

由此, 将自制热辐射计测量结果与商用 MR-5 型辐射热计测量结果进行对比、建立联系, 得到压强差与热辐射强度关系, 同时, 将不同距离和不同温度下测试的压强差带入拟合公式, 误差较小, 拟合效果良好。因此, 基于 U 型压力计设计的热辐射计可以有效替代辐射热计, 从而实现实际应用。

四、实验结论

基于辐射计的原理提出并设计了“黑黑式”基于 U 型压力计的热辐射计, 基于辐射热计的热辐射测量装置是自制热辐射计的基础, 用来验证自制热辐射计的实用型。自制热辐射计测试结果与商用 MR-5 型辐射热计测量结果进行对比, 推导出了压强差 - 辐射值的转换公式, 从而可以根据测得的压强差, 计算出热辐射值。用自制热辐射计测量热辐射强度, 数据分析发现热辐射强度与绝对温度的四次方成正比, 热辐射与辐射源距离存在平方反比的关系, 证明自制热辐射计可以验证斯特藩 - 玻尔兹曼辐射定律, 同时发现自制热辐射计符合辐射反平方定律。因此, 基于 U 型压力计设计的热辐射计可以有效替代辐射热计, 从而实现实际应用, 自制热辐射计操作简单, 各类人员都可轻松操作, 实验原理简单易懂, 可引用到大物理实验教学中。

参考文献:

- [1] 扈又华, 郝小鹏等. 大口径高发射率面型黑体辐射源的研制 [J]. 计量学报, 2021, 42 (3), 314.
- [2] 鹿博, 薛玉琪, 何振辉. 低温热辐射实验设计及教学方法 [J]. 物理实验, 2021, 41 (4): 11.
- [3] 周晶晶, 郝小鹏等. 大口径宽温区真空黑体辐射源的研制 [J]. 计量科学与技术, 2024, 68 (5), 57.
- [4] 廖结英, 王天芳, 李站等. 红外热成像技术用于疾病诊断及中医辨证研究进展 [J]. 中国中医基础医学杂志, 2021 (4): 698.
- [5] 李进, 赵啟伟, 郑红阳等. 航天器可展开式热辐射器的设计方法与应用研究 [J]. 宇航学报, 2024, 45 (10): 1552.

资金支持: 2022 年度校级本科教学改革研究项目 2022YB50

作者简介: 孙振翠 (1975—), 女, 山东菏泽, 副教授, 博士, 无机光电纳米材料。