

• 检测仪器

辐射热防护测试仪的设计探讨

万贤福^{1,2}, 汪 军¹, 李 东¹

(1. 东华大学 纺织学院, 上海 201620; 2. 浙江省新型纺织品研发重点实验室, 杭州 310001)

摘要: 为了对辐射热防护测试仪的设计进行优化, 分析其设计原理, 通过计算机数值模拟的方法, 探讨灯管长度、数量、直径、间距 4 个设计要素对辐射热防护测试仪关键性能指标的影响; 采用单因素分析方法得出辐射热防护测试仪的性能提升, 可以通过调整灯管数量和灯管间隔来实现, 而灯管直径和长度不是需要特别关注的要素; 指出: 灯管数量为 8 支、间距为 15 mm 是较优的选择; 其综合效果需进一步通过两个因素的组合进行比较分析。

关键词: 辐射热防护测试仪; 计算机模拟; 辐射热流; 优化; 设计; 灯管

中图分类号: TS103.6⁺9

文献标志码: A

文章编号: 1001-9634(2015)04-0060-04

Discussion on the Design of Radiant Heat Protection Tester

WAN Xianfu^{1,2}, WANG Jun¹, LI Dong¹

(1. College of Textiles Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. The Key R&D Laboratory Center of New Textile, Hangzhou 310001, China)

Abstract: In order to optimize the design of the radiation heat protection tester, analysis is done to the design principle. Through the computer numerical simulation method, probing is done to the effect of tube length, number, diameter and the spacing on the radiation heat protection tester regarding the key performance. The single factor analysis proves that to upgrade the performance of radiant heat protection tester, it is necessary to do adjustment on the number of tube and tube spacing while the tube diameter and length are not so important. Conclusion is made that the best choice is to use 8 lamps with spacing of 15 mm. The combined effects of the two need further comprehensive analysis.

Key Words: radiant heat protection tester; computer simulation; heat radiation; optimization; design; tube

0 引言

热辐射烧伤问题长期受到人们的关注, 为了有效评价火灾防护服面料的防护性能, 人们研发了辐射热防护测试仪(英文简称: RPP)^[1]。辐射热防护测试仪产生均匀辐射热流量, 当将防护面料暴露于

其下时, 测试穿透面料的热流量, 最后基于 Stoll 曲线^[2-3]预测二度烧伤的时间。仪器的关键在于产生辐射热流的均匀性, 因为 Stoll 曲线是基于暴露在均匀辐射流量的皮肤上的实验数据而来的^[1]。为此, 美国国家消防保护协会制定了标准 NFPA 1977^[4], 对于 RPP 的设计给出了规范。然而, 市场上的产品并非完全遵照规范, 在某些设计上进行了改动, 例如, 美国 Richmond 公司的 RHP 灯管的发光长度及灯管间距都与标准有所区别。商品设计的改动, 或许源于某些性能的提高。因此, 有必要对辐射热防护测试仪的设计进行探讨。

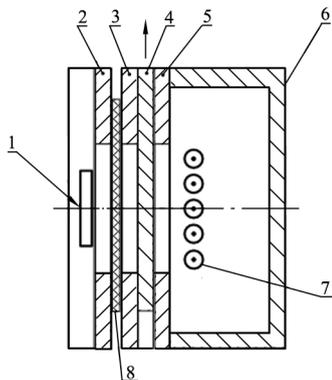
收稿日期: 2015-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106021); 浙江省公益基金项目(2013C31006)

作者简介: 万贤福(1979—), 男, 江西赣州人, 副教授, 主要从事服装热湿舒适性方面的研究。

1 原理分析

如图 1 所示, RPP 主要由以下几部分组成: 石英灯阵列、灯箱、隔热板、遮挡板、试样夹板和热流量传感器。其中, 石英灯阵列由 5 根直线型灯平行排列而成, 是 RPP 仪器的热辐射源; 灯箱包围着灯管阵列, 负责反射热辐射; 隔热板阻挡热量, 防止试样在测试前过热; 遮挡板是一块活动板, 测试前遮挡热辐射, 测试一开始被迅速抽出, 热辐射经由隔热板和试样夹板中间的矩形窗口射入至试样表面; 热辐射穿透试样后被热流量传感器检测, 获得其热流量值。



1—传感器; 2—试样夹板 2; 3—试样夹板 1; 4—挡板;
5—隔热板; 6—金属框; 7—石英灯; 8—试样。

图 1 RPP 横截面示意

热流量传感器放置在试样后面、窗口的中心位置, 外形为直径 40 mm 的圆盘。它检测的区域实际上就是这块圆形区域, 因此 RPP 关注的辐射热流的均匀性也是针对这一区域, 而不是整个矩形窗口。

为了便于分析, 我们把 RPP 系统简化为如图 2 所示的一个简单加热系统, 由灯管阵列、反射灯罩以及位于正前方中心位置的加热目标表面组成。RPP 产生的辐射热流均匀性问题, 也就可以看成此加热系统产生的辐射热流在目标表面上的分布问题。

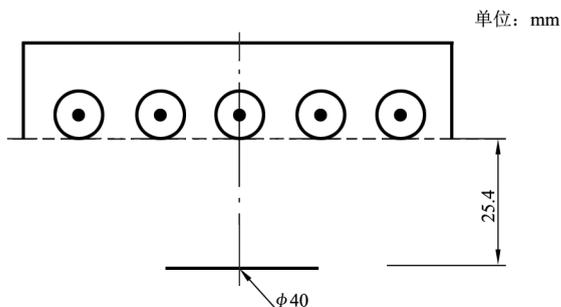


图 2 简化系统示意

通过分析这个简单加热系统, 大致得出几个可能的影响要素(假设目标表面与灯管表面的距离、灯管的排列方式、仪器所用材料以及反射灯罩不变):

- ① 灯管长度 l ;
- ② 灯管的数量 n ;
- ③ 灯管直径 ϕ ;
- ④ 灯管间距 d 。

因此, 在 RPP 系统的设计上可以尝试改变上述要素, 以得到更为优化的设计方案。

2 研究方法

为了探索出优化的设计方案, 我们采用计算机模拟方法; 通过建立精确的计算机模型, 利用模型预测各种要素对目标表面上热流分布的影响, 最终得出可能的优化设计方案。要建立计算机模型, 首先需要建立问题的数学模型, 然后数值化, 最后通过计算机进行演算。对于复杂的热辐射问题, 蒙特卡罗法是一种非常优秀的计算方法。它把复杂的辐射问题看成大量能量粒子的统计学行为, 通过跟踪从辐射源发出的能量粒子, 直到其被吸收或者从系统逃逸, 最后统计目标表面接收到的能量粒子, 获得问题的求解^[5-6]。具体建模涉及几何表面与形体的数学描述, 光线与几何表面的相交计算, 吸收、反射、折射、散射的统计学描述等。

其求解流程如下:

- ① 选择辐射源, 发射能量粒子, 确定其发射位置、方向、波长;
- ② 跟踪能量粒子, 确定与其发生碰撞的表面;
- ③ 如果能量粒子逃逸, 跟踪结束, 转步骤 1, 继续发射新的能量粒子;
- ④ 如果粒子落在目标表面, 则统计表面的能量粒子数;
- ⑤ 根据吸收的数学描述, 确定能量粒子是否被吸收, 如果被吸收, 则跟踪结束; 转步骤 1, 继续发射新的能量粒子;
- ⑥ 如果未被吸收, 根据反射、折射、散射等行为确定其传播的新方向, 转步骤 2, 继续跟踪;
- ⑦ 当所有的能量粒子跟踪完毕后, 根据统计的能量粒子数, 计算热流及其分布。

笔者已建立了 RPP 的蒙特卡罗模型, 采用“VC++”进行编程实现。经过验证, 模型与实验结果十分吻合。模型的细节详见文献^[7], 本文不再对其进行详细阐述, 而把工作的重点放在运用此模型进行优化设计上。

为了便于后续阐述, 我们在 RPP 中建立如图 3 所示的坐标系。坐标系的原点放在试样近灯管侧表面的中心。

为了对计算结果中辐射热流分布的均匀度进行量化, 我们采用变异系数分别对探测区域内 x 轴和 y 轴上的热流计算值进行统计, 将其作为均匀度的指标。变异系数是标准方差对均值的比值, 它反映

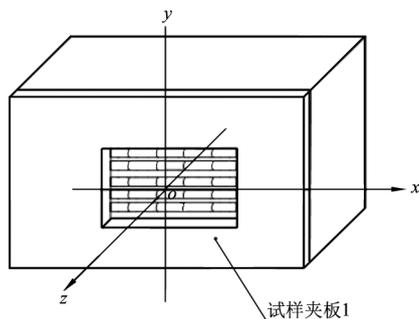


图3 RPP中的坐标系

的是数据的离散程度。其具体计算公式如下：

$$CV_{qx} = \frac{\delta}{|\mu|} \times 100\% = \sqrt{\frac{\sum [q(x_i, 0) - \mu]^2}{n-1}} \times 100\%$$

$$x_i = \{-20, -19, \dots, 0, \dots, 19, 20\} \quad (1)$$

$$CV_{qy} = \frac{\delta}{|\mu|} \times 100\% = \sqrt{\frac{\sum [q(0, y_i) - \mu]^2}{n-1}} \times 100\%$$

$$y_i = \{-20, -19, \dots, 0, \dots, 19, 20\} \quad (2)$$

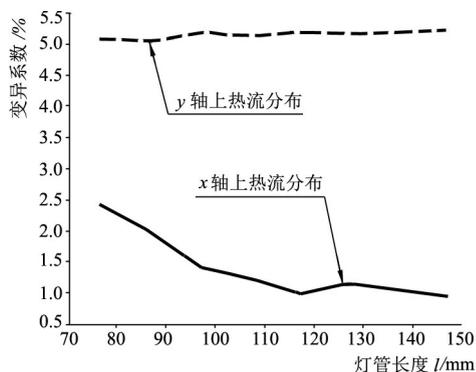
其中, CV_{qx} 和 CV_{qy} 分别为目标区域(即热流传感器所探测的区域)内 x 和 y 轴上热流值的变异系数; δ 为方差, μ 为均值; $q(x_i, 0)$ 为 x 轴上 x_i 点处的热流值; $q(0, y_i)$ 为 y 轴上 y_i 点处的热流值; n 为样本数, 样本都是从 $[-20, 20]$ mm 区间内, 每间隔 1 mm 取一个点; CV_{qx} 表征热流在 x 方向的均匀度, 而 CV_{qy} 表征热流在 y 方向的均匀度; 变异系数越小, 均匀度越好。

3 结果与讨论

为了简化分析的难度, 我们采取单因素分析方法, 即每次仅考虑单一因素的影响, 不考虑多个因素交互作用的影响。为此, 以标准 NFPA 1977 规定的尺寸作为基准, 每次在这个基准上改变其中某一因素, 而其他因素则在基准值保持不变。采用模型进行计算, 输出均匀度指标; 然后分析均匀度指标与各因素之间的关系。模拟探测区域内的平均辐射热流都为 21 kW/m^2 的情形。计算中的物性参数均按照文献[7]进行设置, 其他几何尺寸则按照标准规定进行配置。在标准中, 上述各因素的值依次为 127 mm, 5 支, 9.125 mm, 9.525 mm, 以下针对这些因素分别进行阐述和讨论。

3.1 灯管长度 l 的影响

图 4 所示为灯管长度 l 与探测区域内 x 、 y 轴上的热流分布的变异系数之间的关系。灯管长度 l 的计算取值为: $l = \{77, 87, 97, 107, 127, 137, 147\}$ mm。

图4 探测区域内 x 、 y 轴上热流分布变异系数随灯管长度 l 变化的关系

如图 4 所示: 在此取值范围内, x 轴上的变异系数 (CV_{qx}) 在较低水平(小于 2.5%), 表明 x 轴方向的热流分布比较均匀; 而 y 轴上的变异系数 (CV_{qy}) 则相对较高(约 5%)。这并不难理解, 因为灯管的长度方向沿 x 轴方向, 长度方向灯管的连续分布是石英灯阵列正前方热流场分布均匀的重要原因; 而 y 轴方向, 离散分布的灯管易造成分布不均匀。 CV_{qx} 随着灯管长度显著减小, 而 CV_{qy} 则几乎不受灯管长度影响, 这是因为灯管长度仅仅影响 x 轴方向的热流分布, 而对 y 轴方向的分布影响很小。可以发现当长度大于 117 mm 时, CV_{qx} 几乎不再变化, 这表明当长度大于 117 mm 后, x 轴方向的均匀度几乎不再有进一步的改善空间。标准中采用 127 mm, 此时 CV_{qx} 约为 1%, 均匀度处于很好的水平。

3.2 灯管数量 n 的影响

在改变灯管数量 n 时, 遵循如下的布置原则: 灯管长度方向保持不变; 石英灯阵列保持关于 xoz 平面对称分布, 且平行于 xoy 平面; 相邻灯的间隔不变。在此原则基础上, 我们计算得出图 5 所示的结果: 显然灯管数量的变化对 CV_{qx} 不影响; 而随着灯管数量的增加, CV_{qy} 显著地减小; 但当灯管数量多于 8 支之后, 均匀度不再提升; 灯管数量增加的均匀度, 源于 y 轴方向热源分布范围扩大, 这将增加其中心位置正前方的热流分布。

3.3 灯管直径 ϕ 的影响

灯管直径取值范围为 $\phi = \{5, 6, 7, 8, 9, 12.5, 9.4\}$ mm, 其结果见图 6。可以看出 CV_{qx} 与 CV_{qy} 受灯管直径的影响很小; 因此, 这个影响在设计上几乎可以不考虑。

3.4 灯管间距 d 的影响

灯管间距 d 为灯管中心轴线的间隔距离。计算中, d 的取值范围为: $d = \{9.525, 10, 11, 13, 15,$

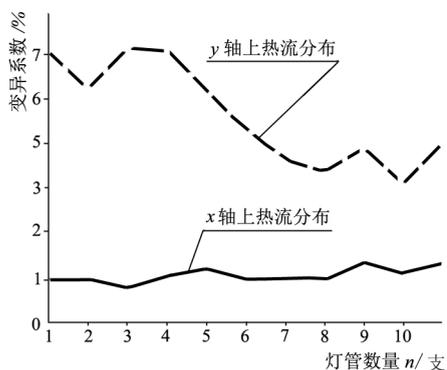


图 5 探测区域内 x、y 轴上热流分布变异系数随灯管数量 n 变化关系

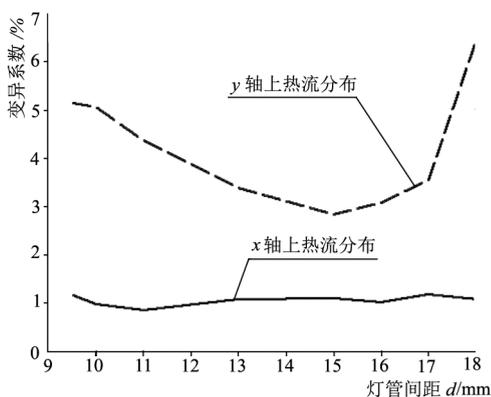


图 7 探测区域内 x、y 轴上热流分布变异系数随灯管间距 d 变化关系

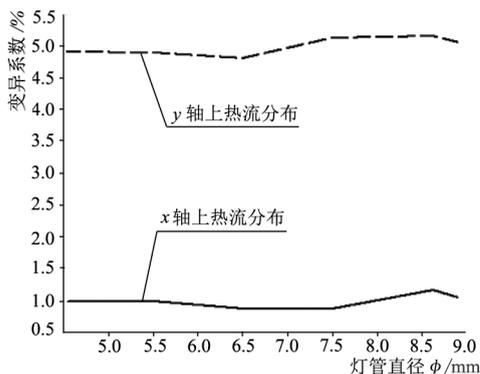


图 6 探测区域内 x、y 轴上热流分布变异系数随灯管直径 phi 变化关系

16,17,18} mm。其结果如图 7 所示： CV_{yq} 随着 d 增大而显著地降低；但是，当 $d=15$ mm 时，继续增大 d ， CV_{yq} 将增大。相比标准而言，改变这个因素可以显著提高热流分布在 y 轴方向的均匀度（ CV_{yq} 从 5% 降低至 3%），而 CV_{qx} 与 d 无关。

3.5 小结

RPP 的设计可以通过增加灯管数量 n 和灯管间距 d 来实现 y 轴方向热流均匀度的提升；而 x 轴方向的热流均匀度可以通过增加灯管长度来提升；由于标准中 x 轴方向的热流均匀度已经很小，并无提升的必要。从单因素分析来看， n 取值为 8 支， d 取值为 15 mm 是较为优化的选择；两者综合效果需要进一步通过两个因素的组合进行比较分析。此外，还需考虑到箱体的尺寸限制以及成本问题，本文不再展开讨论。

4 结论

采用计算机数值模拟的方法，探讨辐射热防护测试仪器设计中的几个关键因素对其关键技术指标的影响。采用单因素分析方法，计算结果表明灯管的直径不是关键要素，而灯管间距和灯管数量是重要的影响因素，能够提升 y 轴方向的热流均匀度；灯管长度 l 是 x 轴方向均匀度的决定性影响因素，但 x 轴方向的热流均匀度已无需进一步提升。

参考文献：

- [1] KELTNER N R. Evaluating thermal protective performance testing[J]. Journal of the ASTM International, 2005, 2(5): 191-204.
- [2] STOLL A M, GREENE L C. Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation[J]. Journal of Applied Physiology, 1959(14): 373-382.
- [3] STOLL A M, CHIANTA M A. Method and rating system for evaluation of thermal protection[J]. Aerospace Medicine, 1969(40): 1 232-1 238.
- [4] NFPA 1977. Protective Clothing and Equipment for Wildland Fire Fighting[S].
- [5] MODEST M F. Radiative heat transfer[M]. 2nd ed. Oxford: Academic Press, 2003.
- [6] 刘伟. 辐射介质传热[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [7] WAN X, WANG F, LU Y, et al. A numerical analysis of the radiation distribution produced by a Radiant Protective Performance (RPP) apparatus [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015(94): 170-177.