

〈红外应用〉

红外线加热下冰层融化特性实验

李超, 谢腾, 陈浩文, 董建锴, 姜益强

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为研究红外加热下冰层融化特性和除冰能效, 搭建了红外线加热除冰实验台, 采用实验的方法, 研究融化过程中冰层内部温度变化, 计算融冰速率及除冰能效。实验结果表明: 利用红外线加热除冰, 辐射能量被冰层表面接收后会以热传导的方式由表面向内部传递; 融冰水蓄存会降低融冰速率, 冰层厚度 5.8 ± 0.2 cm 条件下除冰时间增加 73%; 红外加热管温度对除冰能效影响显著, 低温加热器比高、中温加热器更节能, 其平均能效比后者分别高 21% 和 35%。

关键词: 红外辐射; 除冰; 温度变化特性; 除冰能效

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2017)04-0378-05

Experiment Investigation on Deicing Characteristics Using Infrared Ray as Heat Source

LI Chao, XIE Teng, CHEN Haowen, DONG Jiankai, JIANG Yiqiang

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To investigate the ice melting characteristics and deicing efficiency using infrared ray as heat source, a test-rig was built by which tests were conducted. The internal temperature of ice changes is investigated and the melting rate and energy efficiency of deicing are calculated during the process of melting. The experimental results show that infrared energy will transfer from the ice surface to the interior through conduction after being absorbed at the surface. Melt water accumulation will reduce the ice melting rate, making deicing time increase by 73% under the condition of the ice thickness of 5.8 ± 0.2 cm. The temperature of infrared heating lamp has a significant effect on the energy efficiency of deicing. Compared with the high and medium temperature heaters, the low temperature heater is more energy-efficient, whose average energy efficiency of 21% and 35% are higher respectively than the former ones.

Key words: infrared radiation, deicing, temperature variation characteristics, deicing energy efficiency

0 引言

道路、电网、飞机机翼、动车组转向架等物体的表面在雨雪天气下会结冰, 冰层将造成结冰物体自身结构变化或性能的降低^[1-2]。所以, 需要寻求合理的除冰方式。

当前, 常用的除冰方法按照除冰机理可以分为机械除冰、化学除冰和热力除冰^[3]等。机械除冰是利用各种机械方法使冰层受力脱落; 化学除冰主要是喷撒

化学药剂来降低冰的熔点使冰层融化; 热力除冰则是利用外热源加热冰层使其吸热融化。红外线辐射除冰属于热力除冰的一种, 具有清洁环保、对被除冰物体损害小、加热效率高等优点^[4]。

目前国内外对于红外线辐射除冰的研究及应用较少, 并且多数研究是运用数值模拟手段进行。Tang 等^[5]对微波辐射除冰进行了模拟研究并得到微波除冰的最佳频率是 5.8 GHz, 但若对加热设备操作不当可能会导致微波泄露, 造成微波污染。Li 等^[6]分析比较

收稿日期: 2015-05-16; 修订日期: 2017-03-24。

作者简介: 李超 (1992-), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 严寒地区动车组除冰, E-mail: chaoli0523@163.com。

通信作者: 董建锴 (1982-), 主要研究方向: 热泵空调技术、太阳能高温热利用, E-mail: djkeb@163.com。

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (E2015019)。

了京沪高速粤北段适用的各种除冰系统，并对红外加热除冰方法进行了数值模拟，最终分析得到利用机械与红外加热相结合的除冰方式。陈光^[7]设计了扫雪除冰车的红外加热系统，模拟计算了系统的工作参数和外界条件对冰雪层温度场的影响。李建林等^[8]试验证明红外辐射不能穿透冷冻肉食，在加热过程中食品的温度内低外高，导致加热不均匀，解冻效果不理想，红外辐射加热解冻实用价值不大。

实际工程中，红外线辐射除冰技术在飞行器除冰方面的应用最为广泛^[9-10]，Ryerson^[11]实验发现红外加热系统的除冰效率比除雪效率高，同时还实验得到，红外辐射相比于丙二醇和热风，对飞行器螺旋桨具有更高的除冰效率，且经济性高，需要的操作人员少。George^[12]等实验研究发现冰对红外辐射的吸收率在90%以上，且辐射很难穿透冰层，随着辐射温度的升高，穿透深度增加，当辐射源温度在3000 K以下时，穿透深度不超过0.6 mm。

目前，在红外除冰过程中，对冰层融化特性和除冰能效的研究较少，本文通过实验对上述问题进行了研究。首先设计了红外除冰实验台，之后讨论了实验方案及步骤，最后得到实验结果，并分析冰层内部温度变化特性和红外除冰的影响因素，计算融冰速率及除冰能效。为红外线辐射除冰在相关工程领域的应用提供有益参考。

1 实验台设计及实验方案

1.1 实验台介绍

实验台主要是由红外辐射加热器、实验冰块样品、铝制基底、测温热电偶、质量传感器和数据采集仪等组成，如图1所示。

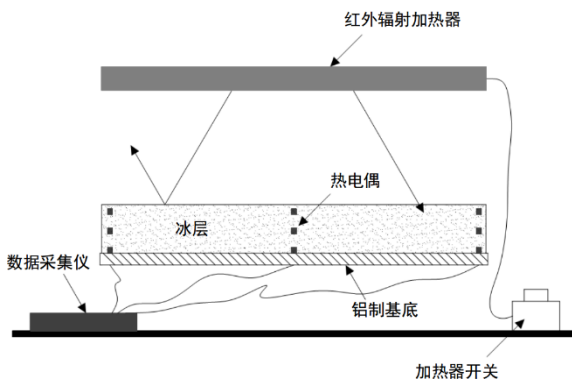


图1 实验系统简图
Fig.1 Experimental system diagram

红外辐射加热器包括灯管和灯座两部分，灯管是定制的钨丝灯，有3种类型，对应的额定温度分别为

1073 K、1773 K和2273 K；灯座用来固定灯管，可以安装3根灯管，并装有聚光罩。实验冰块样品厚度均为 5.8 ± 0.2 cm。铝制基底尺寸为30 cm×30 cm×2 cm，其上设有9个温度测点柱（高度5 cm），实验中铝制基底有两种类型：无水槽型和有水槽型。冰层在无水槽基底上融化时产生的水会沿其周围自然流下；在有水槽基底上融化时，融冰水会蓄存在冰层上部。T型热电偶（ $\pm0.2^{\circ}\text{C}$ ）共27个，分下、中、上3层布置在冰层内部，与铝制基底表面的距离分别为0 cm、2.5 cm和5.0 cm，每层9个测点。质量传感器用来测量融冰水的质量，其量程为20 kg，全量程误差2%。数据采集仪采用安捷伦34972A。结冰基底及测温点的布置如图2所示。

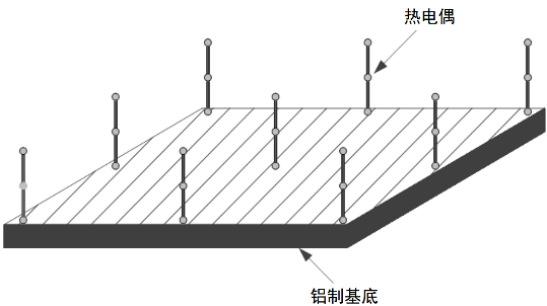


图2 铝制基底及测温点布置
Fig.2 The model of aluminum substrate and temperature measuring points

1.2 实验方案介绍

实验环境温度控制在 $-5.0\pm0.5^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度50%。实验所需冰块样品是将处理过的水（无气泡）连带铝制基底放置在 $-30^{\circ}\text{C}\sim-20^{\circ}\text{C}$ 的室外环境（实验地点哈尔滨市）中进行自然冻结。本文在不同条件下共进行3组实验，下文中分别称为实验一、实验二和实验三。

1) 实验一：冰层和加热器为水平放置，二者间距10 cm，红外加热器额定温度1073 K，铝制基底选用无水槽型。实验开始首先开启安捷伦数据采集仪，数据采集间隔设为5 s，后将加热器打开，直到铝制底板表面温度达到 0°C 以上，证明此时冰层已全部融化，停止实验。

2) 实验二：选用有水槽型铝制基底，融冰水蓄存在冰层表面。其他实验条件和操作与实验一相同。

3) 实验三：冰层和加热器竖直放置，二者间距40 cm，冰层下方设有融冰水收集槽，水槽下设质量传感器。实验主要研究红外除冰速率和除冰能效，每次实验选用不同类型加热器（实验有3种不同额定加热温度1073 K、1773 K和2273 K，每种工况对应灯

管数量为一根、两根和三根,共有9种不同的加热器形式),共进行9次实验。实验操作过程同实验一。实验中需采集融冰水的质量变化数据。

2 实验数据及分析

2.1 实验一工况下冰层融化特性分析

实验中冰层融化产生的水会沿冰层四周自然流下。各层温度测点的数值变化如图3所示。

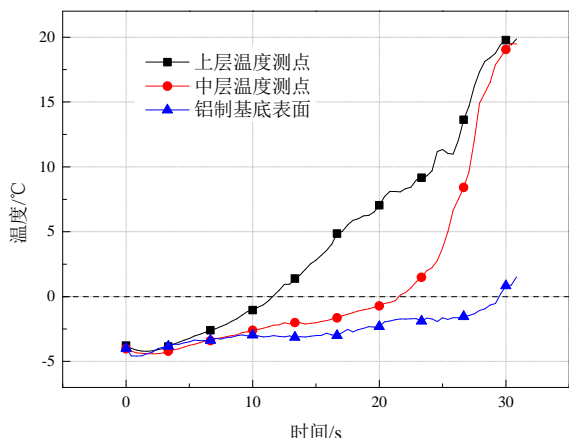


图3 温度测点的数值变化

Fig.3 Numerical changes of temperature measuring points

图3中0℃虚线与3条温度变化曲线的交点对应横坐标值即为内部冰层发生相变融化时刻。由图中可看出,上部、中部和下部冰层由初始状态-3.9℃达到融化状态点0℃所需的时间分别为11.5 min、21.7 min和29.5 min。实验开始后,冰层表面首先接收到红外辐射能量,温度逐渐升高,达到固-液相变点后融化,同时,冰层中、下部的温度也会缓慢上升。上、中、下各层温度值在时间顺序上依次升高至0℃,可知整个融化过程是由冰层表面向铝制基底表面方向逐渐进行。这是因为,在除冰过程中,红外辐射只能对冰层表面进行加热,而不能穿透冰层。热量主要以热传导的方式由冰层表面向内部传递,随着冰层厚度的增加,导热热阻逐渐增大,由表面传递至冰层底部的热流量相应减少,若考虑热量在传递过程中的耗散,实际到达冰层底部的热流量会更少。所以,虽然红外线辐射不能穿透冰层,但由于导热作用,冰层中、下部的温度也会上升,且铝制基底表面上平均温升速率最小。

2.2 实验二工况下融冰水蓄存对冰层融化特性的影响

实验中融冰水蓄存在冰层表面,随着融冰时间的增加,水层的厚度也会相应增大。各层温度测点的数值变化如图4所示。

冰层融化过程中,其内部温度上升缓慢。实验开始后,冰层表面首先融化,产生的融冰水会蓄存在冰层的上部。随着融化进行,融冰水厚度逐渐增加,红外辐射不能穿透液态水加热冰层,只能加热融冰水表层,表层水吸收辐射能量后温度上升并蒸发出水蒸汽,致使在总的红外辐射能中,部分能量用来加热了融冰水或者提供融冰水的气化潜热。水层中热量传递有对流和导热两种形式,因为水层上表面直接接收红外辐射,温度较高可达35℃以上,而其下表面为固-液相变表面,温度维持在0℃左右,温度分布呈上层高下层低的状态,不利于对流换热,所以到达冰层相变面的热量主要是通过导热传递。由于融冰水的蓄存,水层厚度会不断增加,导热热阻也会随之增大,使传递到融化面的热流量逐渐减少。所以,融冰水对辐射能量的吸收和对热传递的阻碍作用导致了冰层内部温度上升速率缓慢,上层、中层和底层的温度测点分别在13.0 min、25.5 min和51.0 min时达到0℃,对比实验一,总的融冰时间增加了73%。融冰水蓄存降低了红外除冰速率。

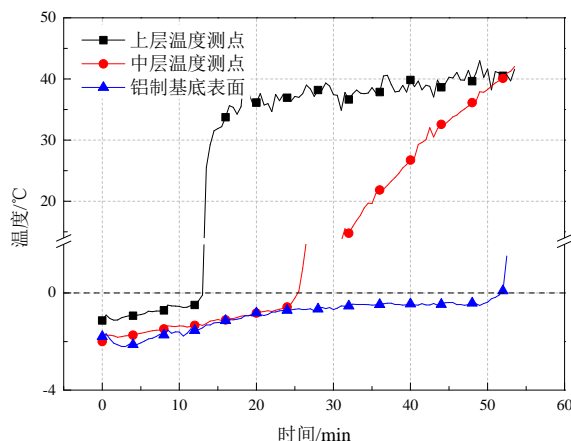


图4 温度测点的数值变化

Fig.4 Numerical changes of temperature measuring points

2.3 实验三工况下红外辐射除冰能效分析

针对竖直情况下红外辐射除冰效率进行分析。图5为在额定加热温度1073 K的条件下,采用不同数量红外辐射灯管除冰时,融冰水质量随时间的变化曲线。

随着辐射灯管数量的增加,除冰速率上升明显,近似认为融冰水的质量随时间线性增加,经过计算,3种工况下的融冰速率分别为1.20 g/s、2.63 g/s和3.73 g/s。不同加热工况下除冰系统的能量利用效率见表1。

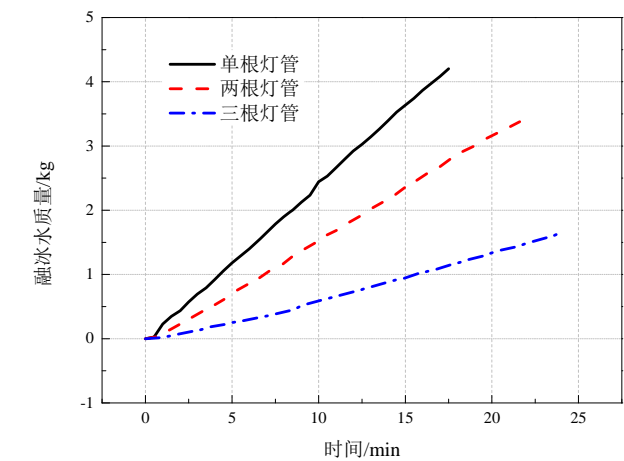


图 5 融冰水质量随时间变化

Fig.5 The mass of melting ice changing with time

表 1 红外辐射除冰系统的能效

Table 1 Energy efficiency of infrared deicing system

灯管数量	融冰速率/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}/10^3$)	总耗电量/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	理论耗能量/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	系统 效能/ η
1	1.20	667		0.550
2	2.63	608	367	0.604
3	3.73	596		0.616

忽略冰层与周围环境的换热量，理论耗能量的计算公式如下：

$$Q_t=Q_i+Q_m+Q_w \tag{1}$$

式中： Q_i 为单位质量理论耗能量； Q_m 为单位质量冰层融化所需能量； Q_i 为单位质量冰层温升所需能量； Q_w 为单位质量融冰水温升消耗的能量。

能效计算公式如下：

$$\eta=\frac{Q_t}{Q} \tag{2}$$

式中： η 为红外除冰系统能效； Q 为单位质量总耗电量。

同时，本文计算了在额定加热温度 1773 K 和 2273 K 条件下的除冰速率以及能效。不同加热工况下红外辐射除冰能效随额定加热温度的变化见图 6。

在额定加热温度 1073 K、三根灯管同时加热条件下，红外除冰系统的能效值最高，为 0.616；而在额定加热温度为 1773 K、单根灯管工作时能效值最低，为 0.425。

当加热器温度保持一致，能效值随加热灯管数量的不同会有所变化，其中，中温（1773 K）加热器受其影响最小，高温（2273 K）加热器受影响最大，能效最大值与最小值分别相差 0.02 和 0.07。

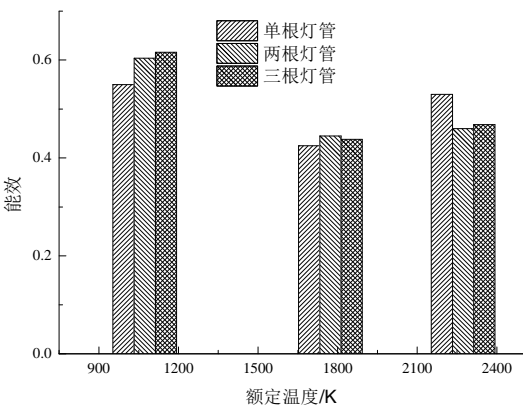


图 6 系统的能效随功率变化

Fig.6 System energy efficiency changing with different power

对于实验中 3 种不同额定加热温度，低温(1073 K)红外加热系统的平均能效值最高，为 0.590；高温加热系统次之，为 0.486；中温加热系统最低，为 0.436。低温加热器平均能效值比高、中温加热器分别高 21% 和 35%，可知加热温度对除冰能效的影响较大。低温加热器节能效果更好，但加热器的额定工作温度越低，融冰速率越慢，所需除冰时间越长；额定工作温度高的加热器除冰速率快，但系统在运行时的安全隐患也会增大。所以，在实际情况中，应对除冰速率、能效和系统的安全性进行综合考虑之后，再选取适合的红外辐射加热系统。

3 结论

通过对实验数据的处理分析，本文得到主要结论如下：

- 1) 利用红外线加热除冰，辐射能量被冰层表面接收后，会以热传导的方式由表面向内部传递，随着冰层深度的增加，导热热阻变大，向冰层内部传递的热量减少。
- 2) 融冰水蓄存会降低除冰速率，在冰层厚度为 5 cm 的条件下，除冰时间会增加 73%。
- 3) 加热工作温度对红外除冰能效影响显著，低温加热器平均能效比高、中温加热器分别高 21% 和 35%，实际情况中，应对除冰速率、能效和系统的安全性进行综合考虑之后，再选取适合的红外辐射加热系统。

参考文献：

[1] FARZANEH M, RYERSON C C. Anti-icing and deicing techniques[J]. Cold Regions Science & Technology, 2011, 65(1): 1-4.

- [2] KLOOW L. 冬季气候条件下的高速列车运营(待续)[J]. 国外铁道车辆, 2015, **52**(1):1-10.
- KLOOW L. High speed train operation in winter climate(to be continued)[J]. *Foreign Rolling Stock*, 2015, **52**(1):1-10.
- [3] 黄钟岳, 陈光, 王晓放, 等. 热力机械复合除雪除冰方法研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2004, **21**(1): 28-30.
- HUANG Z Y, CHEN G, WANG X F et al. Research on thermal and machine method of snow removing[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2004, **21**(1): 28-30.
- [4] FARZANEH M, RYERSON C C. Anti-icing and deicing techniques[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2011, **65**(65): 1-4.
- [5] TANG X W, JIAO S J, GAO Z Y, et al. Study of 5.8 GHz magnetron in microwave deicing[J]. *Journal of Electromagnetic Waves & Applications*, 2008, **22**(10): 1351-1360.
- [6] LI S, YE X. Study on the bridge surface deicing system in Yuebei section of Jingzhu highway[J]. *International Journal of Business & Management*, 2009, **3**(12): 116-121.
- [7] 陈光. 扫雪除冰车红外线加热系统设计及加热过程的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- CHEN G. Design of an infrared heating snow deicing vehicle and numerical simulation of its heating process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003
- [8] 李建林, 孙娟, 徐斌. 冻结肉类食品远红外辐射加热解冻的可行性研究[J]. 红外技术, 1996, **17**(4): 41-43.
- LI J L, SUN J, XU B. Feasibility study of meat thawing methods with far IR radiation[J]. *Infrared Technology*, 1996, **17**(4): 41-43.
- [9] WHITE R P. Infrared deicing system for aircraft: US, US 6092765 A[P]. 2000.
- [10] HESSING H W. Infrared aircraft deicing system[C]// *10th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments and Second NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration*, 2006: 1-6.
- [11] RYERSON C, WYDERSKI M, TARAZANO D, et al. Objective evaluation of fluid, blower, and infrared ground deicing technologies[C]// *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2003: 1-10.
- [12] KOENIG G G, RYERSON C C. An investigation of infrared deicing through experimentation[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2011, **65**(1): 79-87.