

文章编号: 1672-8785(2016)08-0041-07

红外热成像仪在电加温玻璃生产中的应用研究

刘 正

(成都巨峰玻璃有限公司, 四川成都 610300)

摘 要: 介绍了红外热成像技术的工作原理。首次提出将红外热成像技术应用于电加温玻璃生产, 并对其可行性和有效性进行了验证。进一步研究了红外热成像仪在电加温玻璃测试和检验中的应用技术, 并列举了三例实际应用情况。研究表明, 红外热成像仪不仅可以定性分析电加温玻璃制品的加热均匀性和定量检测制品表面的加热温差值, 而且还可以对制品进行无损检测、查找和分析其缺陷以及指导工艺改进工作。

关键词: 红外热成像; 红外热成像仪; 电加温玻璃; 无损检测; 应用

中图分类号: TQ171.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.08.008

Study of Application of Infrared Thermal Imager in Electric Heating Glass

LIU Zheng

(Chengdu Jufeng Glass Co., Ltd., Chengdu 610300, China)

Abstract: The operation principle of infrared thermal imaging is presented. The infrared thermal imaging is firstly proposed to be used in the production of electric heating glass. Its feasibility and effectiveness are verified. Further, the application of infrared thermal imagers in the testing and examination of electric heating glass is studied and three application examples are given. The research result shows that infrared thermal imagers not only can be used to qualitatively analyze the heating uniformity of electric heating glass and quantitatively measure the heating temperature difference of glass surface, but also can be used to nondestructively test glass products, find and analyze their defects and conduct the improvement of glass manufacturing processes.

Key words: infrared thermography; infrared thermal imager; electric heating glass; non-destructive testing; application

0 引言

电加温玻璃是一种既具有玻璃的高透光性, 同时又具有一定除冰化霜 (除雾) 能力的透明制品。其除冰化霜原理是, 在玻璃制品的夹层中植入电加热器, 然后当制品所处环境的温度

低于一定数值时, 加热器开始工作, 将电能转换成热能; 热能通过热传递的方式到达玻璃制品的外层 (除冰化霜) 或内层 (除雾), 从而满足玻璃制品的使用环境要求和加热安全性需求。

近年来, 随着我国工业技术的突飞猛进和日常生活需求的快速增加, 电加温玻璃的应用

收稿日期: 2016-04-12

作者简介: 刘正 (1987-), 男, 湖南衡阳人, 工学硕士, 主要从事有机/无机复合材料方面的研究。

E-mail: liujin9856@126.com

领域不断拓宽,其附加功能也逐渐由简入繁。例如,用于军工领域的防弹电加温玻璃要求具有防弹和电加温双重功能;用于机车领域的高抗冲电加温玻璃要求具有抗冲击性和电加温双重功能;用于航空工业的电加温玻璃则要求具有泄静电、电磁屏蔽以及电加温三重功能。在以上这些应用中,电加温功能均为产品的基本功能。因此,利用红外热成像仪对电加温玻璃的生产和测试检验技术进行研究具有非常重要的实际意义。

1 红外热成像技术

1.1 红外技术

相关研究表明,当温度高于绝对零度(-273°C)时,自然界中的任何物体都会以电磁波的形式向外界辐射能量。这种红外辐射基于任何物体在常规环境下都会产生自身的分子和原子无规则运动的原理。分子和原子的运动愈剧烈,辐射能量愈大;反之,辐射能量愈小^[1]。

随着红外技术的不断发展,人们已经利用特殊的感光材料实现了对红外辐射的感知。不

同物体的红外辐射波长虽然不同,但是利用特殊的光学透镜则可有效滤除杂乱的背景辐射^[2],以有选择性地感知物体在某一特定波长上的红外辐射,从而获得相关的有效信息。

1.2 大气窗口

在空气中传播时,红外辐射会受到大气中二氧化碳、水蒸气和臭氧等的吸收作用;另外,悬浮颗粒物的散射和反射以及各种气象条件也会导致红外辐射的能量衰减^[3]。

结合图 1 可知,当只考虑大气分子吸收时,在近红外($0.78 \sim 1.0 \mu\text{m}$)、短波红外($1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$)、中波红外($3 \sim 5 \mu\text{m}$)和长波红外($8 \sim 14 \mu\text{m}$)波段有 4 个大气红外“透射窗口”^[4](由于近红外和短波红外两个窗口几乎相连,本文将其合并为一个)。在上述波段内,大气分子对红外辐射的吸收相对较弱,且红外线的穿透能力强,故将其称为“大气窗口”。

本文利用红外热成像仪的原理是,所用红外探测器的响应光谱能够与长波红外波段的“大气窗口”很好地匹配^[5]。

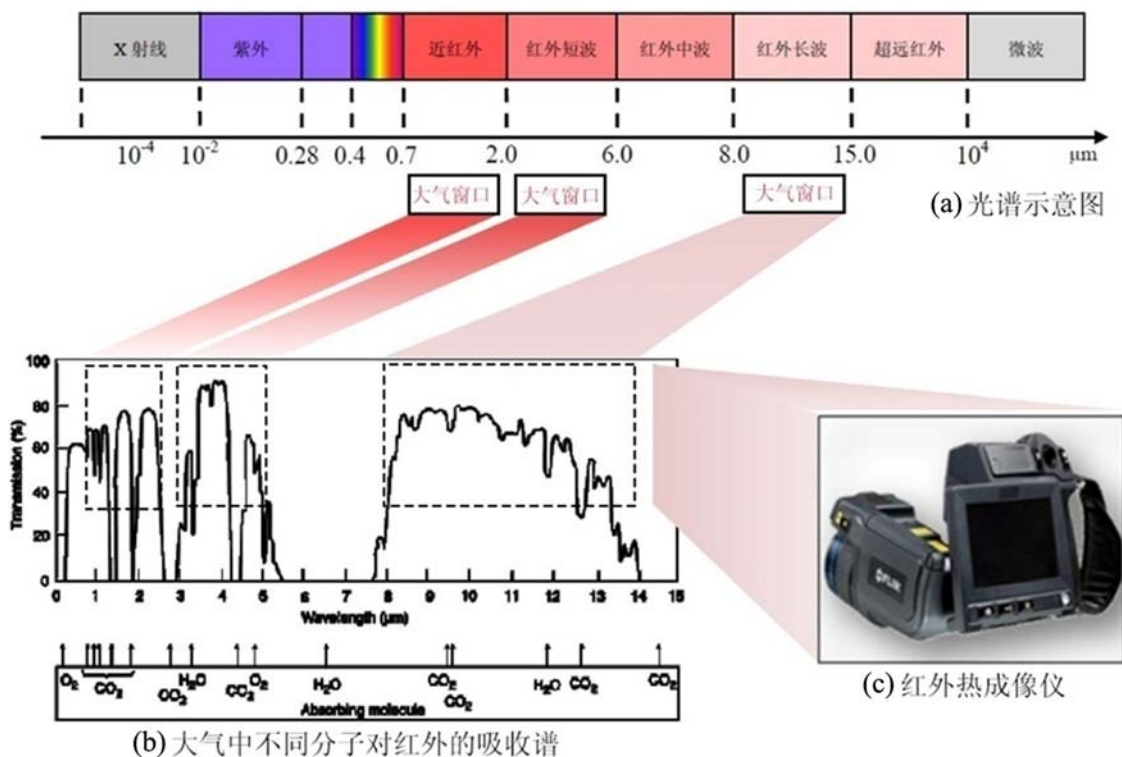


图 1 红外热成像技术的应用原理

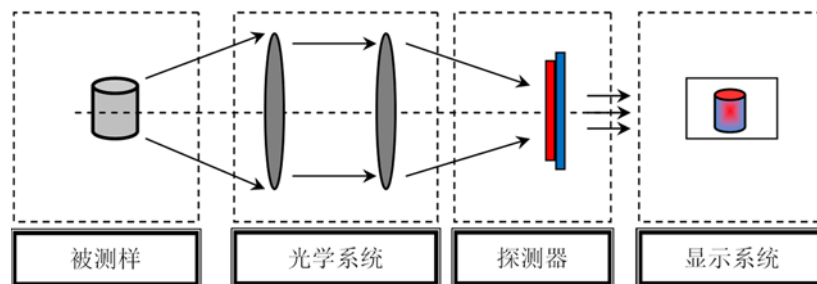


图 2 红外热成像仪的成像原理

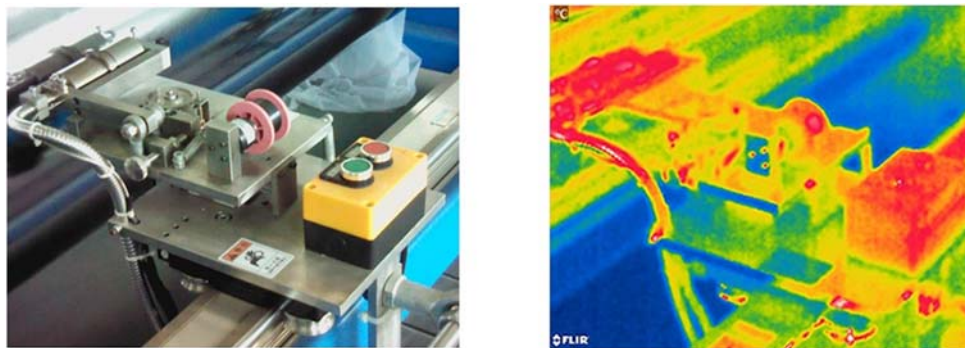


图 3 某型机车电加温玻璃的红外热图 (左: 绕网机的实景图; 右: 绕网工序的红外热图)

1.3 红外热成像仪

本文采用美国 FLIR 系统公司生产的 T610 型红外热成像仪 (见图 1(c))。该仪器通过摄像镜头的特殊感光材料以及设备内置的探测器阵列, 可以将被测物体表面各处的红外辐射强度数据转换为热量分布图 (见图 2)。

1.4 电加温性能测试

通过参照《GJB 961-1990 飞机电加温玻璃电热性能检测方法》标准 (第 10.3 条, 方法 I: 红外摄像法), 我们对成都巨峰玻璃有限公司自行研制的产品进行了测试。

2 红外热成像仪的应用

由前述章节可知, 红外热成像仪的测试过程具有非接触式、非破坏性等特点。正是由于检测方式的安全性和普遍适应性, 红外热成像仪目前已经广泛应用于军工、电子电力、机械制造和建筑节能等领域^[6]。

近年来, 随着玻璃制造及玻璃深加工技术的不断发展, 国内已有不少学者尝试并成功地将红外热成像技术应用于玻璃行业。例如, 杨慧杰等人^[7]初步探索了红外热成像仪在浮法玻璃

生产线检修上的应用, 并有效证明了红外热成像技术在玻璃行业应用的可能性; 王建铭^[8]将红外热成像仪应用于玻璃制造工厂, 并利用红外技术优化了玻璃瓶罐的生产工艺; 郭世昌等人^[9]借助红外热成像技术, 研究了电加温玻璃加热效果的影响因素。本文在前人的基础上, 主要研究了红外热成像仪在电加温玻璃生产和测试检验中的应用。

2.1 电加温玻璃生产中的应用

根据加热媒介的不同, 电加温玻璃产品目前主要分为金属电阻丝加热玻璃 (简称“电阻丝型”) 和镀膜加热玻璃 (简称“镀膜型”) 两种。其中, 前者以金属铜箔为电极, 通过编织金属电阻丝作为加热媒介来制作加热器, 并将其置于电加温玻璃的夹层胶片中; 后者则在电加温玻璃夹层的内表面上镀制相应规格的导电膜层, 即利用导电银胶和铜箔来制作电极。两者均能在外加电源的情况下实现电加温功能。

2.1.1 电阻丝型电加温玻璃生产中的应用

图 3 为电阻丝型电加温玻璃生产过程中的绕网工序对比图。

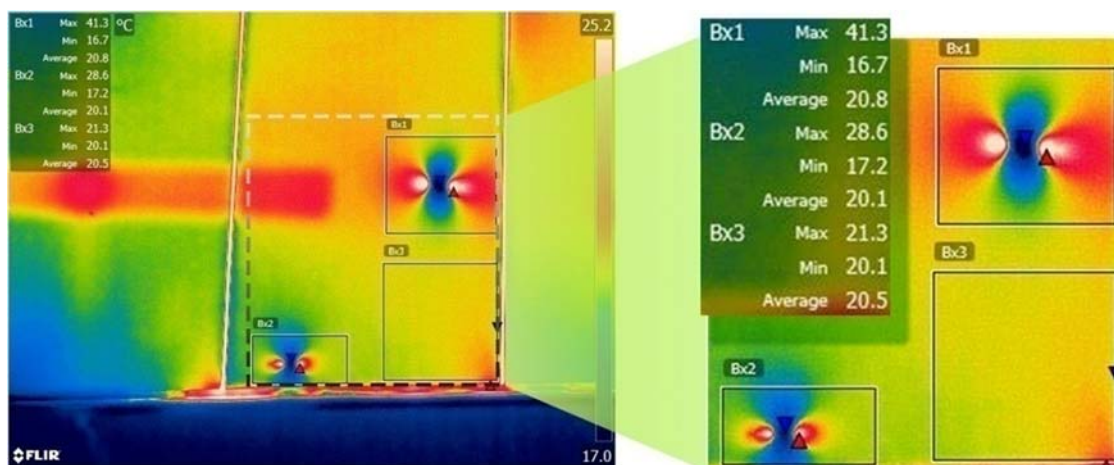


图 4 镀膜型电加温玻璃半成品的红外热图

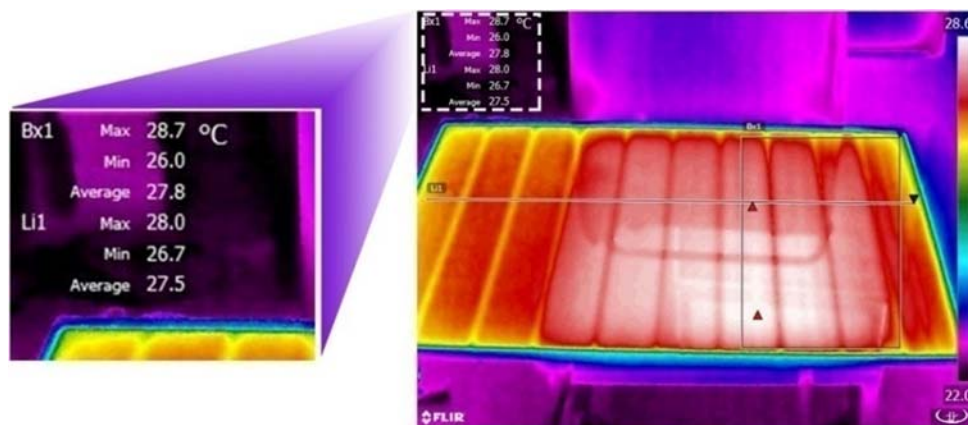


图 5 某型可视窗电加温玻璃的红外热图

与传统的手工编织工艺不同,使用绕网机制网能够极大地提高生产效益,并能增加制网精度以及制备出不同曲率的丝网。但是绕网机的使用同样有其弊端,比如绕网过程中容易出现乱丝、并丝和断丝现象,且易因丝径小而难以直观判断。结合图 3 可知,利用红外热成像仪可以随时监控绕网过程中的异常现象,以尽早发现故障,从而提高产品合格率。

2.1.2 镀膜型电加温玻璃生产中的应用

图 4 为镀膜型电加温玻璃半成品的红外热图。由图中数据可知,正常区域 Bx3 的温差 $\Delta T = 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ΔT 由式 (1) 得出);而膜层中的两处异常区域 Bx1 和 Bx2 的温差 ΔT 分别为 $24.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,远大于正常区域 Bx3 的温差值。

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (1)$$

式中, ΔT 为加热温差值; T_{max} 为测试区域的最高温度; T_{min} 为测试区域的最低温度。

根据测试数据并结合镀膜工序分析后发现,膜层中的两处异常区域是由于镀膜腔中引入杂质造成的,此时可通过优化镀膜工艺来改进产品质量。由此可知,通过对镀膜半成品进行红外热成像检测,不仅可以进行有效筛选,中止缺陷半成品的后续加工和提升产品合格率,而且还可以分析半成品的红外热图,为镀膜生产工艺的优化提供参考。

2.2 电加温玻璃测试检验中的应用

2.2.1 某型电加温玻璃的红外热成像检验

图 5 所示为某型可视窗电加温玻璃的红外热图检验结果。该图是在电加温玻璃通电的情况下,于加热控温区间 ($25 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 内的某一时刻拍摄的。由图中的检测数据可知,该型电加温

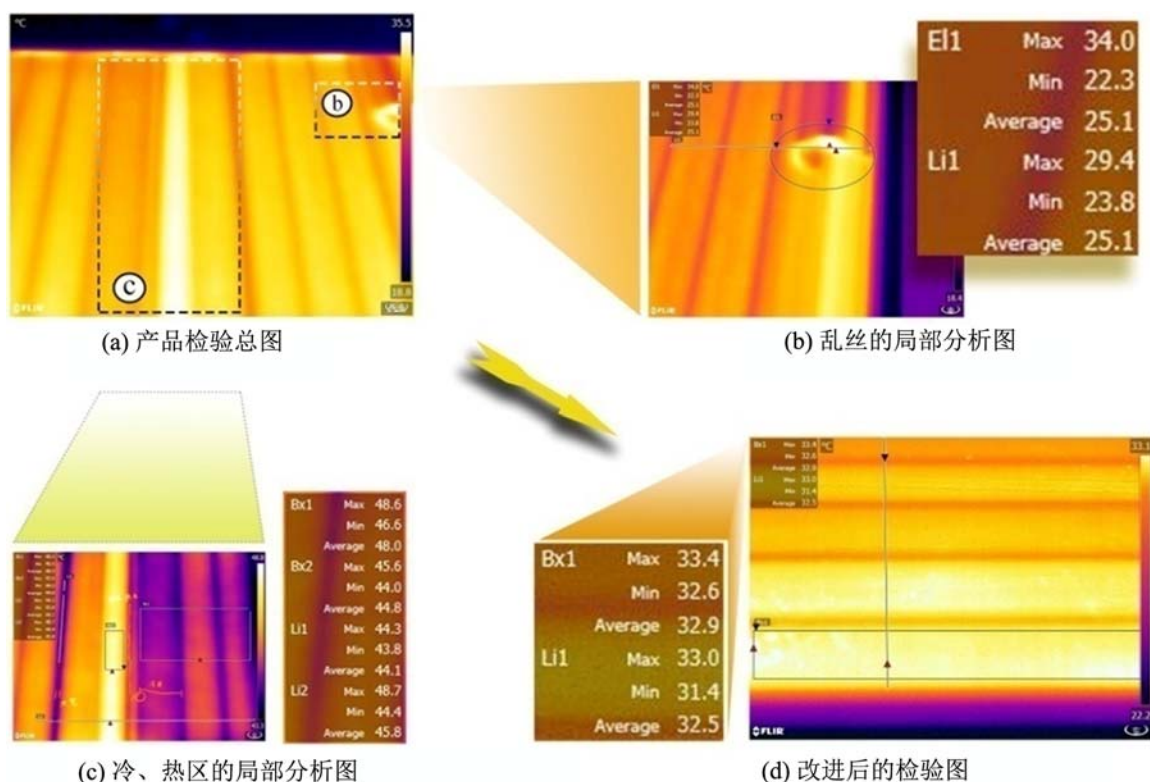


图 6 某型机车电加温玻璃的红外热图

玻璃具有较好的电加温均匀性。

通过分析该产品的红外检测热图可知: (1) 产品各个分区所产生的热量较为均衡; (2) 纵向测温线 Li1 反映了不同分区、同一水平位置上的表面温差, 温差值为 $\Delta T=1.7^{\circ}\text{C}$, 平均温度为 $T_{avg}=27.8^{\circ}\text{C}$; (3) 指定区域 Bx1 反映了不同分区面区域的表面温差, 温差值为 $\Delta T=1.3^{\circ}\text{C}$, 平均温度 $T_{avg}=27.5^{\circ}\text{C}$ 。由此可知, 通过红外热成像仪的检测, 不仅可以有效判别产品各个分区的大致加热情况, 为用户的使用提供有效参考, 而且还可以定量检测产品的表面温度, 为后续产品的设计与生产提供依据。

2.2.2 某型机车电加温玻璃的红外热成像检验

图 6 所示为某型机车类风挡电加温玻璃的红外热图检验结果。图中反映了该型机车玻璃的工艺优化过程。在改进前的红外检测 (见图 6(a)) 过程中, 产品出现了图 6(b) 和图 6(c) 中的两种缺陷。通过分析原因和优化工艺, 我们获得了满足性能指标的改进产品 (见图 6(d))。

由以上数据可知, 图 6(b) 所示区域内存在不规则的环状亮斑, 其中亮斑区域 El1 中的最大

温差达 11.7°C ; 图 6(c) 所示区域内出现冷区及热区, 其中热区 Bx1 的 $T_{avg}=48.0^{\circ}\text{C}$, 冷区 Li1 的 $T_{avg}=44.1^{\circ}\text{C}$ 。在被测样品断开电源并恢复室温后, 我们通过对两个区域进行检查发现: (1) 图 6(b) 所示区域存在乱丝情况。结合制备工艺分析其产生原因, 即分区工序中的断丝清理不彻底, 导致合片工序引入乱丝。(2) 图 6(c) 所示区域中存在连续断丝 (冷区) 和并丝 (热区) 两种情况。结合制备工艺分析其产生原因, 即夹层加热器的加热电阻丝的丝径小 ($\Phi=0.02\text{ mm}$), 分区工序中手工操作难以达到所要求的精度且处理不当致使缺陷产生。综合上述原因分析可知, 分区工序是该型产品缺陷形成的关键过程。因此, 我们针对该工序进行了质量控制, 最终成功制备出了图 6(d) 所示的加热均匀性较好的产品。由此可知, 通过红外热成像仪的检测, 可以克服传统制备工艺中存在的固有局限性 (如电阻丝丝径小、分区窄而多等不利操作的影响), 从而有效实现对产品的生产指导。

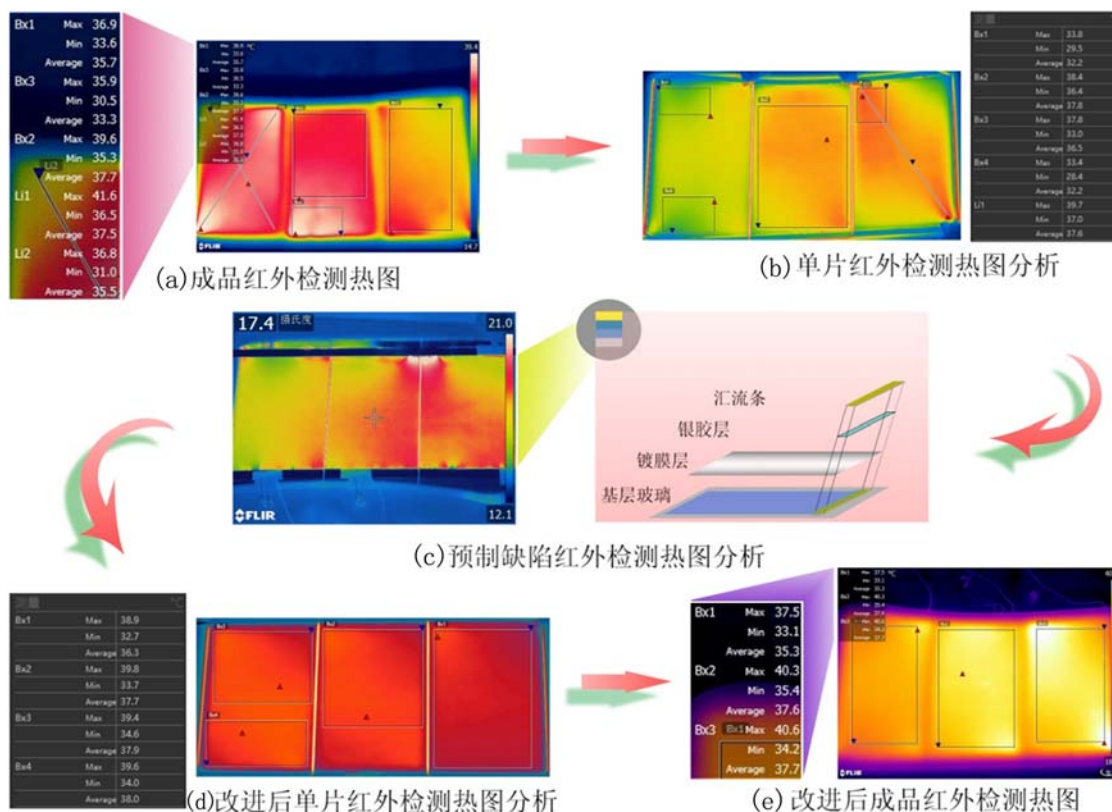


图 7 某型镀膜型风挡电加温玻璃的红外热图

表 1 某型镀膜型风挡电加温玻璃红外热图中的相关测试数据 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

测试项		Bx1	Bx2	Bx3	Bx4	Lx1	Lx2	$\Delta T'$ ①
7a	Max	36.9	39.6	35.9	—	41.6 ②	36.8	11.1
	Min	33.6	35.3	30.5	—	36.5	31.0	
	Average	35.7	37.7	33.3	—	37.5	35.5	
7b	Max	33.8	38.4	37.8	33.4	39.7	—	11.3
	Min	29.5	36.4	33.0	28.4	37.0	—	
	Average	32.2	37.8	36.5	32.2	37.6	—	
7d	Max	38.9	39.8	39.4	39.6	—	—	7.1
	Min	32.7	33.7	34.6	34.0	—	—	
	Average	36.3	37.7	37.9	38.0	—	—	
7e	Max	37.5	40.3	40.6	—	—	—	7.5
	Min	33.1	35.4	34.2	—	—	—	
	Average	35.3	37.6	37.7	—	—	—	

注: ① $\Delta T'$ 为多个测试区域的最大温差值; ② “41.6” 为对应测试区域内的最大或最小温度值。

2.2.3 镀膜型电加温玻璃的红外热成像检验

图 7 及表 1 所示为某型镀膜型风挡电加温玻璃的红外热图检验结果。图 7 反映了该型镀膜玻璃的工艺优化过程。在改进前的红外检测

(见图 7(a)) 过程中, 产品出现了加温不均匀的情况。通过分析原因 (见图 7(b) 和图 7(c)) 和优化工艺 (见图 7(d)), 我们获得了满足性能指标的改进产品 (见图 7(e))。

由表 1 可知, 图 7(a) 中加热区域的最大温差值为 $\Delta T'=11.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 此值超出了该型产品的加温均匀性指标。因此, 结合该型电加温玻璃的制备工艺, 我们设计了图 7 所示的一种工艺改进方案。

首先对该型产品的单片镀膜件进行了类似检测。结合图 7(b) 及表 1 中 7b 数据可知, 单片镀膜件的热量分布图与成品件相似, 其最大温差值为 $\Delta T'=11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此值不仅超出了技术指标, 而且还大于成品的温差值, 因此排除了镀膜后续工序的影响。经过进一步分析, 我们制备出了银胶层预制缺陷样件并对其进行了红外热成像检测 (见图 7(c))。从中可以明显发现, 缺陷处的热成像状态与单片镀膜件热区的辐射状态几乎一致。因此可以初步断定, 造成成品加温均匀性不合格的原因是银胶层存在缺陷 (气泡空穴和杂质等)。结合前述缺陷分析结果, 通过对丝印银胶工序进行工艺优化和控制, 我们制备出了图 7(d) 中的单片镀膜件并对其进行了红外热成像检测。结合图 7(d) 以及表 1 中的 7d 数据可知, 四个被测区域的最大温差值为 $\Delta T'=7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 且平均温度为 $36.3\sim 38.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验结果表明, 通过控制银胶层的制备工序, 单片镀膜件的加温均匀性可以得到较为明显的提升, 这也就有效验证了前述分析过程。最后, 通过在原有制备工艺的基础上进行工艺优化 (丝印银胶工序), 我们制备出了成品件并对其进行了红外热成像检测 (见图 7(e))。结合表 1 中的 7e 数据可知, 改进后成品件的三个被测区域的最大温差值为 $\Delta T'=7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均温度为 $35.3\sim 37.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 很好地满足了产品的加温均匀性指标。

综合上述分析过程可知, 红外热成像检测不仅是一种有效的产品检验技术, 而且还是一

种可为产品的工艺优化提供有效指导的产品质量分析手段。

3 结束语

(1) 作为一种监测手段, 红外热成像仪能够有效适用于电加温玻璃的生产过程。通过对生产过程进行监控和指导, 不仅有利于提升产品合格率, 而且还有助于优化生产工艺。

(2) 作为一种检验手段, 红外热成像仪不仅能够较好地满足目前电加温玻璃产品的测试和检验, 而且还能够克服传统工艺中存在的局限性。利用红外热成像检测技术可以定性 (量) 分析产品的电加温性能, 从而为用户的使用提供有效指导, 为产品的工艺优化提供理论依据, 为后续产品的设计与生产提供参考。

参考文献

- [1] 陈衡. 红外物理学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [2] 张盈. 热成像系统的噪声 [J]. 红外技术, 2003, 25(2): 33-36.
- [3] 蔡毅, 王岭雪. 红外成像技术中的 9 个问题 [J]. 红外技术, 2011, 33(4): 34-40.
- [4] 卡约里著. 戴念祖译. 物理学史 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
- [5] Rogalski A. Progress in Focal Plane Array Technologies [J]. Progress in Quantum Electronics, 2012, 36: 342-473.
- [6] 梅林. 红外热成像无损检测技术及其应用现状 [J]. 无损检测, 1999, 21(10): 466-468.
- [7] 杨慧杰, 郭立波, 沈洁, 等. 热成像仪在玻璃行业的应用初探 [J]. 玻璃, 2012, 5(1): 3-6.
- [8] 王建铭. 红外热像仪在玻璃工厂的应用 [J]. 玻璃与搪瓷, 2011, 39(4): 34-40.
- [9] 郭世昌, 吴云龙. 电加温玻璃的电学性能设计 [J]. 建材世界, 2010, 31(5): 17-19.