

## 热核聚变实验堆中超导母线绝缘层的红外热波检测\*

陈大鹏<sup>1)</sup> 曾智<sup>2)3)†</sup> 张存林<sup>3)</sup> 金学元<sup>3)</sup> 张峥<sup>1)</sup>

1) (北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

2) (重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 400047)

3) (首都师范大学物理系, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室、太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

(2011年6月5日收到; 2011年8月27日收到修改稿)

本项研究的目的在于探索热核聚变实验堆中超导母线绝缘层的主动式红外热波检测方法. 文中用装有热水的薄膜袋对预埋脱黏缺陷的试件表面进行接触热激励; 给出了在面热源作用下长圆柱内一维瞬态导热的近似理论模型; 通过对理论模型的模拟和分析, 发现对热波降温信号进行微分处理可有效提高缺陷和非缺陷信号对比度; 与闪光灯激励的结果进行比较, 显示接触热激励的检测深度优于闪光灯脉冲热激励.

**关键词:** 热核聚变实验堆, 超导母线绝缘层, 接触热激励, 红外热波

**PACS:** 42.30.-d

## 1 引言

热核聚变实验堆采用超导母线来传递磁体系统所需要的电流, 超导母线位于馈线系统内(馈线系统为超导母线提供了一个真空、4 K 的低温工作环境), 由常温 300 K 降至 4 K, 冷却和磁体位移会造成母线的拉伸, 从而使绝缘层承受相应的拉伸和挤压, 容易产生脱黏类的缺陷<sup>[1-3]</sup>.

红外热波技术作为一种快速、有效的无损检测方式, 在国际上已经逐渐应用于 ITER (国际热核聚变实验堆) 项目某些部件的检测和评估. Seki 等人搭建了红外热成像系统来检测日本原子能机构开发的 ITER 偏流器碳纤维增强复合材料(CFC) 部件, 他们将高压热水注入管中对 CFC 部件进行热激励, 并利用红外反射装置同时监测试件的三面, 来检测 CFC 与冷却管之间的黏接质量<sup>[4]</sup>. 欧洲原子能共同体(EURATOM), Durocher 等人同时利用两种激励方式的(锁相和 SATIR 方法) 红外热波技术检测 ITER 中的 CFC 部件, 并将得到的数据进行

融合来提高检测的可靠性<sup>[5,6]</sup>. Lotta 等的研究证实了在考虑发射率的前提下, 红外热成像方法可以实现 ITER 偏流器中金属钨部件温度的精确测量<sup>[7]</sup>. Gauthier 等人在喷嘴上搭建广角红外热成像装置, 监测主燃烧室内等离子体相互作用<sup>[8]</sup>. 而关于超导母线绝缘层的红外热波检测, 未见相关报道.

超导母线绝缘层的处理有两种方式, 一种是采用软模真空固化, 另一种是手工包裹(浸胶的玻璃丝带和聚酰亚胺胶带叠包后固化). 尤其是手工包裹的工艺, 其多层界面的结构使得传统的无损检测技术(X 射线, 超声等) 受到限制. 红外热波技术是通过各种热激励方式(闪光灯、超声、电吹风等) 主动对物体施加可控热激励, 使物体内部缺陷以表面温场变化的差异形式表现出来<sup>[9-11]</sup>. 针对不同的被检物及缺陷类型, 采用适用的热激励方式及数据处理方法对提高其检测能力至关重要. 本项研究尝试利用表面接触热激励的红外热波方法对手工包裹工艺, 预埋脱黏缺陷的超导母线绝缘层进行检测. 在理论分析及模拟的基础上, 通过对热图序列

\* 国家自然科学基金联合基金(批准号: 61079020) 和输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室访问学者项目(批准号: 2007DA10512710405) 资助的课题.

† E-mail: zzh406@hotmail.com

进行微分处理来提高缺陷信号与非缺陷信号的对比度, 并与传统的闪光灯热激励的结果进行比较, 以期得到一种可靠的、适用于超导母线绝缘层的无损检测方法.

## 2 实验原理及热传导理论模型

超导母线绝缘层的红外热波检测原理图如图 1 所示, 对绝缘层表面施加一瞬时的热流  $q$ , 热像仪采集试件表面温场变化. 假设传热介质是均匀的, 并且只考虑  $r$  方向一维导热的情况, 柱坐标的热传导微分方程可以写为 [12-14]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{f(r, t)}{\kappa}, \quad (1)$$

$T(r, t)$  是位于  $r$  处  $t$  时刻的温度,  $f(r, t)$  是热源方程,  $\kappa(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$  是热传导率,  $\alpha(\text{m}^2/\text{s})$  为热扩散系数. 在两介质接触面 (被检物表面与空气) 解方程 (1) 需要满足温度连续边界条件  $T_1 = T_2$ , 以及绝热边界条件

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = 0. \quad (2)$$

考虑一个瞬时平面热源, 在  $t = 0$  时刻施加在长圆柱  $r'$  处, 方程 (1) 中的  $f(r, t)$  可以写为

$$f(r, t) = q\delta(r')\delta(t), \quad (3)$$

$q$  是常数, 代表单位面积的热量, 因此方程 (1) 可以写为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{q\delta(r')\delta(t)}{\kappa}. \quad (4)$$

方程的解为 [15]

$$T(r, t) = \frac{C}{4\pi\alpha t} e^{-(r^2+r'^2)/4\alpha t} I_0\left(\frac{rr'}{2\alpha t}\right), \quad (5)$$

其中,  $C = q/\rho c$ ,  $\rho$  为密度,  $c$  为比热容,  $I_0$  为零阶第一类修正贝塞尔函数.

瞬时热源施加在被检物的表面  $r' = r_0$ , 那么试件表面  $r = r_0$  处的温度表达式可写为

$$T(r_0, t) = \frac{C}{4\pi\alpha t} e^{-r_0^2/2\alpha t} I_0\left(\frac{r_0^2}{2\alpha t}\right). \quad (6)$$

如果热传导的过程中在距表面深度  $d$  处碰到空气类的缺陷, 只考虑一次反射的情况, 并近似为全反射. 那么缺陷处对应的试件表面温度表示为

$$T(d, t) = \frac{C}{4\pi\alpha t} \left[ e^{-r_0^2/2\alpha t} I_0\left(\frac{r_0^2}{2\alpha t}\right) + e^{-[(r_0-d)^2+d^2]/2\alpha t} I_0\left(\frac{r_0^2-2r_0d}{2\alpha t}\right) \right]. \quad (7)$$

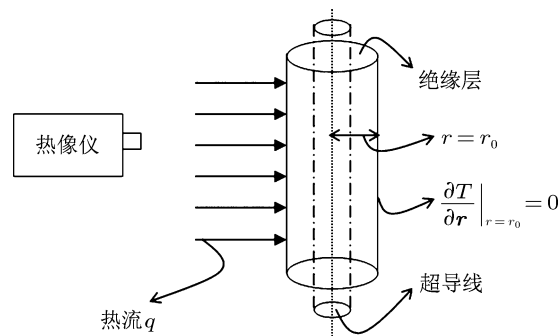


图 1 实验原理示意图

图 2 为 (6), (7) 式的理论模拟曲线, 三条曲线分别表示的瞬时面热源作用后试件表面非缺陷区域、3 mm 深缺陷处和 2 mm 深缺陷处温度随时间的变化过程, 可以看到, 降温过程中缺陷点与非缺陷点的曲线出现了分离, 且较浅的缺陷分离的较早, 这是由缺陷处热波的反射造成的.

实验过程中就是利用热像仪探测试件表面温度的分布及变化, 利用缺陷点与非缺陷点温度变化的不同来找到缺陷的位置.

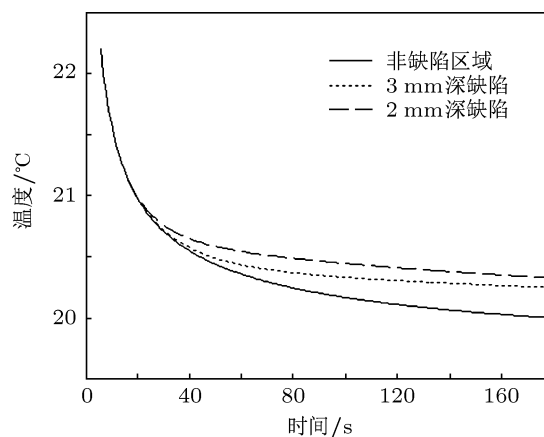


图 2 理论模拟曲线

## 3 试件及实验设备介绍

超导母线试件金属管外径 22 mm, 绝缘层采用手工包裹分层缠绕工艺 (浸胶的玻璃丝带和聚酰亚胺胶带叠包后固化), 厚度 6 mm. 金属管内部埋有超导线, 试件 1/4 和 1/2 处各有一深度约为 2 mm 和 3 mm 的模拟脱黏缺陷, 图 3 为试件照片.

实验系统中, 红外热像仪是制冷型热像仪, 温度分辨率为 0.02 K, 图像大小为 320×240 像素, 敏

感波段为  $8\text{--}9\ \mu\text{m}$ , 采集频率与采集时间可以实时调整.



图3 试件照片

## 4 实验结果

用装有热水的薄膜袋对试件表面进行接触热激励, 然后快速移开, 形成一个表面热源. 热像仪采

集频率为 10 Hz, 采集时间 180 s, 图 4 为实验结果的原始热图像.

绝缘层采用多层缠绕工艺, 造成试件表面不平. 利用表面接触式热激励, 会产生表面加热不均匀. 同时, 由于绝缘层导热慢, 缺陷和非缺陷区域信号差别不大, 以及噪声的干扰使得图 4 所示的原始图像中很难分辨出缺陷区域.

试件表面加热不均匀性也在图 5, 缺陷区域与正常区域的温度变化曲线中表现为三条曲线的初始温度不同. 其中, 曲线 1, 2 分别为 2 mm 和 3 mm 深的缺陷区域, 曲线 3 为非缺陷区域. 降温过程中曲线的分离点也没有理论模拟曲线 (图 1) 那么清晰, 通过图 5 的曲线很难判断缺陷区域和非缺陷区域. 但三条曲线降温的速率是有差别的, 曲线 3 比曲线 1 和 2 降温要快, 主要体现在前 60 s.

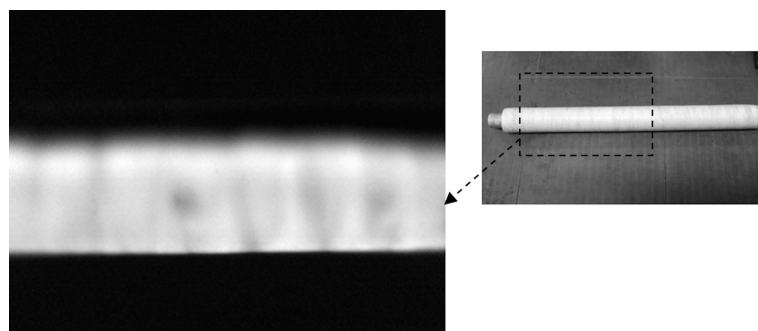


图4 原始热图像

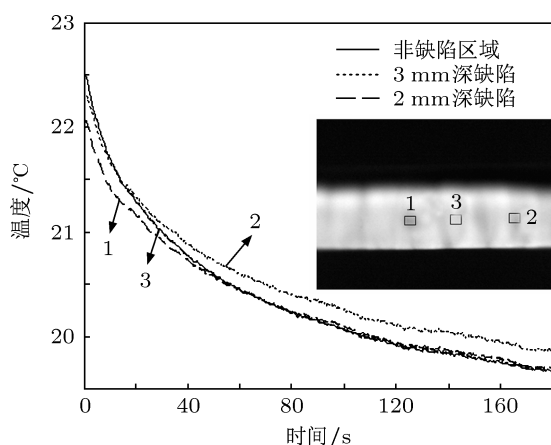


图5 温度 - 时间曲线

为了消除表面加热不均的影响, 对温度 - 时间曲线做微分. 图 6 为理论模拟微分曲线, 图 7 为实验结果的微分曲线. 为了更好的显现出不同深度缺陷微分曲线的变化规律, 纵坐标的值采

用  $\ln(1000 \times |dT/dt|)$ . 在理论微分曲线和实验微分曲线中, 都可以看到, 非缺陷区域的温度变化率高于缺陷区域. 对于不同深度的缺陷, 在降温初始阶段较浅缺陷的温度变化率大于较深缺陷, 而在某一时刻两条曲线发生了反转. 实验结果和理论模型是基本符合的, 即较浅缺陷刚开始降温快, 在某一时刻后较深缺陷降温快. 在理论模拟中是考虑的一维热扩散模型, 而实验数据则受三维热扩散的影响, 因而, 实验结果中三条曲线慢慢开始重合, 而理论模拟曲线在较晚时间仍然具有一定温差和不同的温度变化率.

因此, 对热图像中每一个点做微分处理, 得到变化率热图序列. 如图 8 所示为第 12 s 的微分热图, 消除了表面热激励不均匀的影响, 不同深度的两个脱黏缺陷清晰地显现出来.

作为比较, 图 9 给出了闪光灯脉冲激励的实验

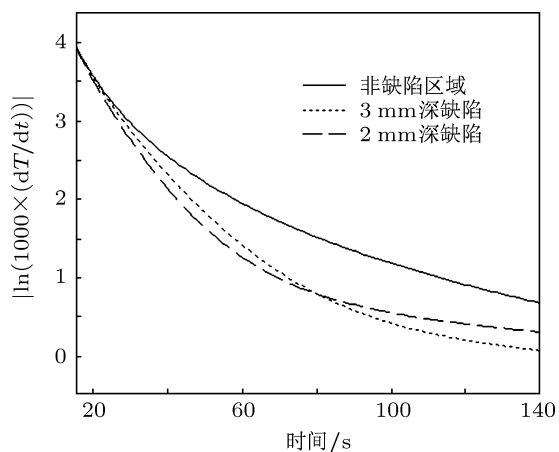


图6 理论模拟微分曲线

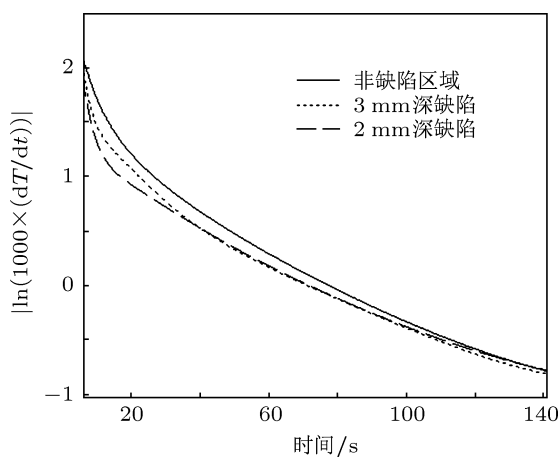


图7 实验微分曲线

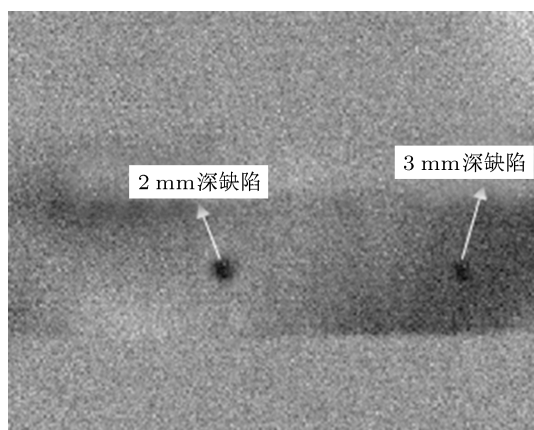


图8 微分热图像

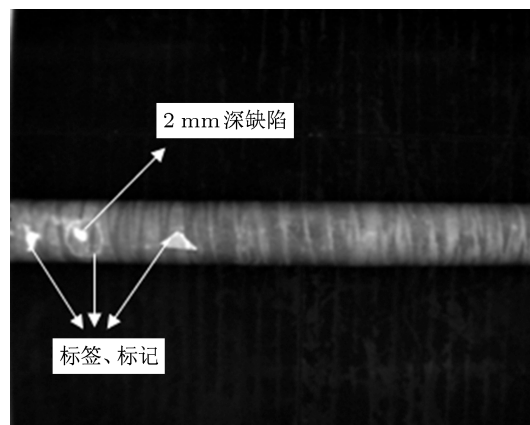


图9 闪光灯脉冲激励结果

结果. 闪光灯能量 9.6 kJ, 脉冲宽度 2 ms. 图 9 为实验结果的原始热图像, 可以看到闪光灯激励的热均匀性优于接触热激励, 2 mm 深的缺陷在原始热图中清晰得显现了出来. 但由于闪光灯加热能量低, 且材料的热扩散系数小, 未能检出位于试件 1/2 处的深层缺陷.

## 5 结论

针对热核聚变实验堆中超导母线多层包裹工艺绝缘层的缺陷检测, 文中利用装有热水的薄膜袋对预埋模拟脱黏缺陷的试件表面进行接触热激励, 给出了在瞬时面热源作用下长圆柱的一维瞬态热传导近似理论模型, 并绘制理论模拟曲线及微分曲线. 实验结果中缺陷区域与非缺陷区域的温度变化规律与理论模型基本符合, 即非缺陷区域温度变化率的绝对值高于缺陷区域, 且较浅缺陷刚开始降温快, 在某一时刻后较深缺陷降温快. 对原始热图序列进行微分处理得到变化率热图序列, 消除了初始加热不均匀性的影响, 提高了热图像中缺陷信号与非缺陷信号的对比值. 与闪光灯激励的结果进行比较, 发现接触热激励的检测深度要优于闪光灯脉冲热激励.

[1] Zhang Y B, Song Y T, Wu S T, Wang J Q 2005 *Cryogenics & Superconductivity*. **33** 14 (in Chinese) [张远斌, 宋云涛, 武松涛, 王建青 2005 低温与超导 **33** 14]

[2] Wang Z B, Song Y T, Wang Z W, Li C C, Jin X 2010 *Nucl. Fusion & Plasma Phys.* **30** 152 (in Chinese) [王志滨, 宋云涛, 王忠伟, 李长春, 戢翔 2010 核聚变与等离子体物理 **30** 152]

- [3] Guan W Y, Liu T H, Zheng G G 1965 *Acta Phys. Sin.* **21** 1345 (in Chinese) [管惟炎, 刘体汉, 郑国光 1965 物理学报 **21** 1345]
- [4] Seki Y, Ezato K, Suzuki S, Yokoyama K, Enoda M, Mori S 2010 *Fusion Eng. Des.* **85** 1451
- [5] Reichle R, Brichard B, Escourbiac F 2007 *J. Nucl. Mater.* **363** 1466
- [6] Durocher A, Vignal N, Escourbiac F, Farjon J L, Schlosser J F 2005 *Fusion Eng. Des.* **75–79** 401
- [7] Lotta F, Netchaieff A, Escourbiac F 2010 *Fusion Eng. and Des.* **85** 146
- [8] Gauthier E, Roche H, Thomas E 2007 *Fusion Eng. Des.* **82** 1335
- [9] Favro L D, Kuo P K, Thomas R L 1994 *QND* **13A** 395
- [10] Favro L D, Han X Y, Ouyang Z 2001 *Int. J. Fatigue* **23** 471
- [11] Zeng S Q, Xu H F, Li J Y, Liu X D 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1338 (in Chinese) [曾绍群, 徐海峰, 李骄阳, 刘贤德 1997 物理学报 **46** 1338]
- [12] Zhang H J 1992 *Heat Conduction* (Beijing: Higher Education Press) p15 (in Chinese) [张洪济 1992 热传导 (北京: 高等教育出版社) 第 15 页]
- [13] Chen L, Cheng Y M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6047 (in Chinese) [陈丽, 程玉民 2008 物理学报 **57** 6047]
- [14] Schneider p J 1955 *Conduction of Heat Transfer* (Reading, Mass.: Addison-Wesley Publishing Company) p5–7
- [15] Carslaw H S, Jaeger J C 1959 *Conduction of Heat in Solids* (New York: Oxford University Press) p259

# Infrared thermal wave imaging for inspecting the insulation layer of superconducting busbar in thermonuclear experimental reactor\*

Chen Da-Peng<sup>1)</sup> Zeng Zhi<sup>2)3)†</sup> Zhang Cun-Lin<sup>3)</sup> Jin Xue-Yuan<sup>3)</sup> Zhang Zheng<sup>1)</sup>

1) (*School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

2) (*Institute of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China*)

3) (*Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China*)

(Received 5 June 2011; revised manuscript received 27 August 2011)

## Abstract

This work aims at developing a thermal wave imaging method for testing the insulation layer of superconducting busbar in thermonuclear experimental reactor. In the paper, a film bag filled with hot water is used to heat the sample surface. The approximate theoretical model of transient heat conduction under an instantaneous cylindrical surface source in cylindrical structure is given. Through simulation and analysis of the theoretical model, it is found that differential processing of the thermal cooling signals can improve the signal contrast between defects and non-defects areas. Compared with the flash pulse excitation method, the contact excitation method can detect deep defects.

**Keywords:** thermonuclear experimental reactor, busbar insulation layer, contact heat excitation, thermal wave imaging

**PACS:** 42.30.-d

---

\* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61079020), and the Visiting Scholarship of State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Grant No. 2007DA10512710405).

† E-mail: zzh406@hotmail.com